

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА**

**СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ  
ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБ'ЄКТА**

Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи  
з дисципліни

**«Автоматизація технологічних процесів»**

*(для студентів 4 курсу всіх форм навчання  
за напрямом підготовки 0922 (6.050702) «Електромеханіка»)*



**Харків  
ХНАМГ  
2011**

Синтез системи автоматизації технологічного об'єкта. Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни «Автоматизація технологічних процесів» (для студентів 4 курсу всіх форм навчання за напрямом підготовки 0922 (6.050702) «Електромеханіка») / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: С. М. Єсаулов, О. Ф. Бабічева. – Х.: ХНАМГ, 2010.- 75 с.

Укладачі: С. М. Єсаулов,  
О. Ф. Бабічева

Рецензент: канд. техн. наук А. К. Бабіченко

Ці методичні вказівки присвячені вивченню дисципліни «Автоматизація технологічних процесів» і складають основу закріплення знань з прикладної теорії автоматичного регулювання при виконанні розрахунково-графічної роботи.

Затверджено на засіданні кафедри електричного транспорту  
протокол №2 від 8.09.2009 р.

## ВСТУП

Системи автоматичного регулювання (САР) для різних технологічних процесів (ТП) складають основу прикладної теорії автоматичного керування. Виконання розрахунково-графічної роботи є заключним етапом навчання студентів з дисципліни «Автоматизація технологічних процесів» і має своєю метою систематизацію, закріплення і розширення теоретичних знань і практичних навичок при рішенні конкретних задач. При виконанні розрахунково-графічної роботи студенти набувають досвід індивідуального самостійного вивчення технічної літератури, з виконання різних розрахунків, що мають прикладне значення, освоювати основи патентного пошуку при рішенні технічних питань (технологічних, дослідженнях, конструкторських, економічних) і сучасних інженерних підходів при автоматизації технологічних об'єктів (ТО).

В процесі виконання розрахунково-графічної роботи студент вивчає сучасні методи дослідження ТП і об'єктів керування, засоби автоматизованого проектування пристроїв автоматики і використовує комп'ютерну техніку на всіх стадіях синтезу САР.

Проектування в роботі передбачає індивідуальне творче пророблення всіх питань, розглянутих програмою дисципліни.

За узгодженням з викладачем автор проекту може використовувати в своїй роботі освоєні ним інженерні методики і програмні продукти для побутових комп'ютерів, розроблені з метою автоматизації проектування систем керування для різних галузей промисловості, що публікуються в періодичних технічних виданнях і на сайтах у мережі Internet.

Розрахунково-пояснювальна записка повинна містити основні результати розрахунків за всіма етапами проектування, обґрунтування рішень прийнятих при синтезі системи автоматизації ТО і висновку за результатами виконаної роботи відповідно індивідуальному завданню.

У роботі необхідно представляти функціональні, структурні, принципів, монтажні та ін. схеми. Ілюстративний матеріал доцільно виконувати за допомогою програмних продуктів, доступних для широкого користувача, освоєних автором самостійно або при вивченні інших дисциплін.

Розрахунково-графічна робота виконується відповідно до вимог ЄСКД згідно з ДСТ 2.102-68, 2.301-68, 2.307-68, 2.722-68, 2.705-70, 2.109-73, 2.702-75, 2.701-76, 2.316-81, 2.755-87 та ін.

Кожен студент визначає свій варіант розрахунково-графічної роботи з номера в журналі академічної групи або в заліковій книжці.

Розрахунково-пояснювальна записка розрахунково-графічної роботи обсягом 20-25 стор. виконується на аркушах формату А4 (210×297 мм) повинна містити:

1. Титульний аркуш (додаток 1).
2. Вступ.
3. Загальну характеристику технологічного об'єкта й об'єкта керування, умов експлуатації об'єкта керування і вимог до локальної системи автоматичного регулювання технологічним процесом.
4. Методи моделювання об'єкта керування і висновки за результатами проведених досліджень.
5. Функціональну і структурну схеми САР з описом роботи пристрою.
6. Розрахунки основних компонентів САР за обраним каналом керування, що включають: прийомний, проміжні і виконавчий елементи, блок живлення, засоби комунікації в мережі Ethernet та ін.
7. Економічний аналіз розробленого технічного рішення.
8. Висновок за результатами виконаної розрахунково-графічної роботи.
9. Список літератури.
10. Зміст.

Графічний матеріал усіх розділів розрахунково-графічної роботи виконується на аркушах формату А4. Функціональна, загальна принципова електрична схеми САР і перелік компонентів (специфікація) – на листі формату А1 (594× 841 мм).

# ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБ'ЄКТА І ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

## ***Приклад.***

Технологічний об'єкт: мийно-прибиральний корпус депо.

Об'єкт керування: автономне джерело живлення контактної мережі.

Мийно-прибиральний корпус (МПК) депо *призначений* для видалення забруднень із зовнішньої поверхні рухомого складу і проведення мийно-прибиральних робіт усередині салонів електричного транспорту.

Підвищена вологість усередині приміщення МПК вимагає від обслуговуючого персоналу особливої уваги при використанні електромеханічного устаткування.

Для підвищення безпеки співробітників МПК електричний транспорт у корпусі підключається до контактної мережі низької напруги, що живиться від автономного джерела живлення (АДЖ).

При експлуатації джерела живлення контактної мережі на його роботі позначаються умови експлуатації, що викликають нагрівання випрямних елементів до неприпустимих величин.

Мета: необхідно розробити автоматичну систему регулювання процесу нагрівання випрямних елементів АДЖ в мийно-прибиральному корпусі депо.

Вимоги до САР: передбачити ручний і автоматичний режими регулювання температури нагрівання випрямних елементів; взаємозв'язок із системами заборони обслуговування транспорту при неприпустимому потенціалі на корпусі рухомої одиниці, короткому замиканні і зниженій напрузі в контактній мережі, несправному устаткуванні на постах обслуговування або на водоочисній установці; передачу даних про рухомий склад, що пройшов обслуговування в МПК, службам підприємства взаємозалежних між собою локальною комп'ютерною мережею (Ethernet).

## 1. ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

### 1.1. Розробка аналітичної моделі статички

*Статичний або сталий режим* роботи ТО характеризується незмінними в часі значеннями вхідних і вихідних параметрів.

Функціональна залежність величин вихідної -  $Y$  від вхідної -  $X$  у сталому режимі називається *статичною характеристикою об'єкта*:

$$Y = f(X). \quad (1.1)$$

Відношення збільшень цих величин у статичному режимі називається коефіцієнтом передачі (посилення)  $K_n$  даного об'єкта:

$$K_n = \frac{\delta Y}{\delta X}. \quad (1.2)$$

Використання того або іншого каналу впливу ТО як регулюючий, в основному, визначає крутість його статичної характеристики, тобто величина  $K_n$  каналу впливу пропорційна кутовому нахилу дотичної в графічних інтерпретаціях залежностей.

На діючих об'єктах статичні характеристики легко одержати експериментальним шляхом. При проектуванні об'єктів такі дослідження виконують аналітичним методом з коректуванням отриманих результатів експериментами на реальних фізичних моделях ТО.

Досліджуємо статичні характеристики автономного *випрямного агрегату* (ВА), що передбачається використовувати, наприклад, у мийно-прибиральному корпусі депо для живлення локальної контактної мережі усередині приміщення. Розглянутий технологічний об'єкт схематично зображений на рис. 1.1.

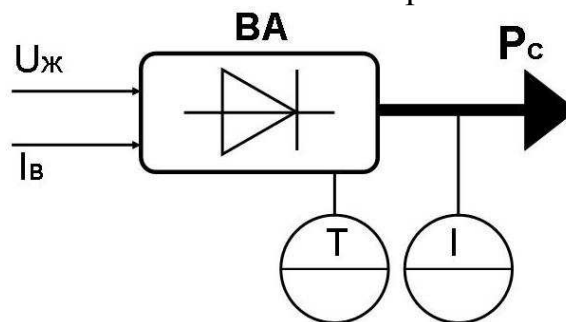


Рис. 1.1 – Функціональна схема випрямного агрегату

Електричні параметри ВА залежать від потужності споживачів  $P_c = f(I)$  на виході пристрою або струму в контактній мережі  $I$ . Вхідними величинами для ВА є напруга живлення  $U_{ж}$  і струм мережі  $I_в$  (на вході пристрою).

Важливою особливістю силового елемента будь-якого випрямного агрегату є розсіювання ним значної кількості тепла. Користуючись технічними характеристиками елементів, легко переконатися в залежності вихідної потужності  $P_{вих} = f(T)$  випрямляча від температури  $T$  напівпровідникового елемента, що наглядно ілюструє рис. 1.2.

Перегрів активного елементу вище припустимого рівня призводить до виходу його з ладу. Для відводу теплової потужності звичайно передбачають охолоджувачі (пристрої примусового обдуву, радіатори і комбіновані пристрої).

Для глибокого вивчення статистики випрямляча шляхом створення точної теплової моделі, що враховує всі можливі нюанси, є досить складною задачею. Однак для рішення вищезазначеної проблеми часто користуються спрощеними моделями, в основу яких покладені балансові схеми теплообміну. Для розробки таких математичних описів компоненти пристрою замінюються нескладними еквівалентами зі стандартними характеристиками, що істотно спрощують розрахунки, але добре погодяться з реальними процесами.

Теплову рівновагу розглянутого пристрою можна представити як сукупність елементів з рівномірно нагрітими поверхнями. Очевидно, що одна поверхня – напівпровідника, має більш високу температуру, ніж друга – теплоносія, що відбирає надлишкове тепло.

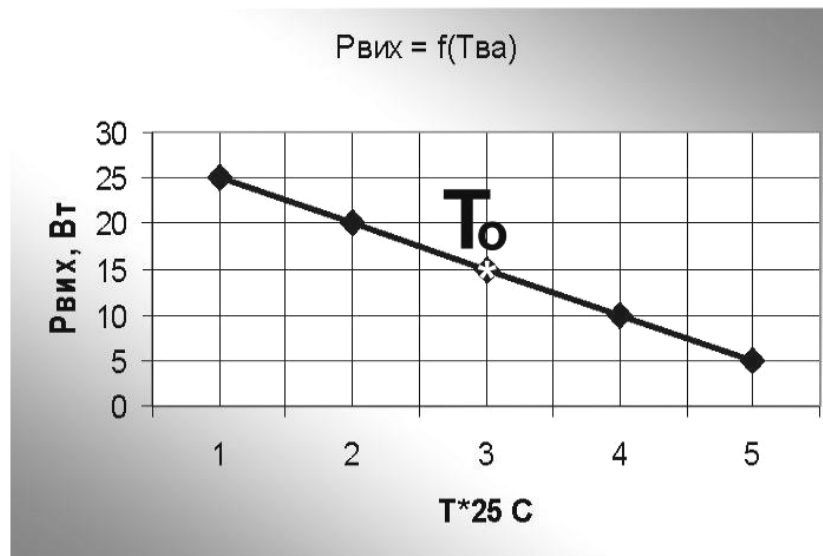


Рис. 1.2 – Залежність вихідної потужності від температури

Для ВА необхідно визначити ефективний керуючий вплив на ланцюги джерела живлення ВА ( $U_1, I_1$ ) або вентилятора ( $U_2, I_2$ ) примусового охолодження, щоб при різних навантаженнях  $P_0$  у локальній мережі підтримувати нормальну робочу температуру  $T_0$  силового напівпровідника випрямляча. Для більшості напівпровідникових випрямлячів величин  $T$  не повинна перевищувати  $+110...+125^\circ\text{C}$ .

При нормальному статичному режимі приймаємо наступні параметри ВА (табл. Д1):

- силові мережі джерела живлення  $U_{10} = 220\text{ В}$ ,  $I_{10} = 10\text{ А}$ ;
- вторинні мережі живлення  $U_{00} = 90\text{ В}$ ,  $I_{00} = 20\text{ А}$ ;
- втрати у вторинній мережі живлення  $U_{20} = 90\text{ В}$ ,  $I_{20} = 4,4\text{ А}$ ;
- температура ВА  $T = 75^\circ$  (точка  $T_0$  на рис.1.1).

У статичному режимі всі параметри процесу, а значить і температура ВА, залишаються незмінними. Приймаючи цю умову, можна записати рівняння балансу, що відбиває витрати потужності джерела живлення  $P_1$  на навантаження в контактній мережі  $P_0$  і тепло  $P_2$ :

$$P_1 = P_0 + P_2, \quad (1.3)$$

або у вигляді

$$k_1 U_1 I_1 = k_0 U_0 I_0 + k_2 U_2 I_2, \quad (1.4)$$

$k_i$  – коефіцієнти пропорційності.

Для розрахунку статичних характеристик

$$P_0 = f(U_1); P_0 = f(I_1); P_0 = f(U_2); P_0 = f(I_2) \quad (1.5)$$

впливає з рівняння (1.4) підставляючи чисельні значення всіх параметрів, крім величин, залежність між якими визначається.

Для характеристики  $P_0 = f(U_1)$  рівняння можна записати у вигляді ( $k_i = 1$ ):

$$I_0 = \frac{10U_1 - 396}{90} = 0,11U_1 - 4,4. \quad (1.6)$$

Для  $P_0 = f(I_1); P_0 = f(U_2); P_0 = f(I_2)$ :

$$I_0 = \frac{220I_1 - 396}{90} = 2,44I_1 - 4,4; \quad (1.7)$$

$$U_0 = U_2;$$

$$I_0 = \frac{2200 - 4,4U_2}{U_2}, \quad (1.8)$$

$$I_0 = \frac{2200 - 90I_2}{U_2}, \quad (1.9)$$

відповідно.

Задаючи значення величин  $U_1, I_1, U_2, I_2$ , за формулами (1.6) – (1.9) можна одержати вихідні дані для оцінки залежностей (1.5).

Для функції (1.6) результати розрахунків наведені в табл.1.1 (інтервал варіювання  $U_1 = \pm 15\%$ ).

На рис.1.3 зображена графічна залежність  $P_0 = f(U_1)$  у безрозмірних одиницях, яка отримана за допомогою програми *MS Excel*.



Таблиця 1.1 – Розрахунок параметрів залежності  $P_0 = f(U_1)$

$U_1, \text{В}$	$U_1/U_{10}$	$I_0, \text{А}$	$I_0/I_{00}$
180	0,818182	15,6	0,778272
185	0,840909	16,15556	0,805988
190	0,863636	16,71111	0,833705
195	0,886364	17,26667	0,861421
200	0,909091	17,82222	0,889137
205	0,931818	18,37778	0,916853
210	0,954545	18,93333	0,94457
215	0,977273	19,48889	0,972286
220	1	20,04444	1,000002
225	1,022727	20,6	1,027718
230	1,045455	21,15556	1,055435
235	1,068182	21,71111	1,083151
240	1,090909	22,26667	1,110867
245	1,113636	22,82222	1,138583
250	1,136364	23,37778	1,1663

Аналогічно розраховуються дані й для інших залежностей (табл.1.2) з урахуванням наступних реальних інтервалів варіювання змінних:  $I_1 = \pm 40\%$ ;  $U_2 = \pm 40\%$ ;  $I_2 = \pm 40\%$ .

$$P_0 = f(U_1).$$

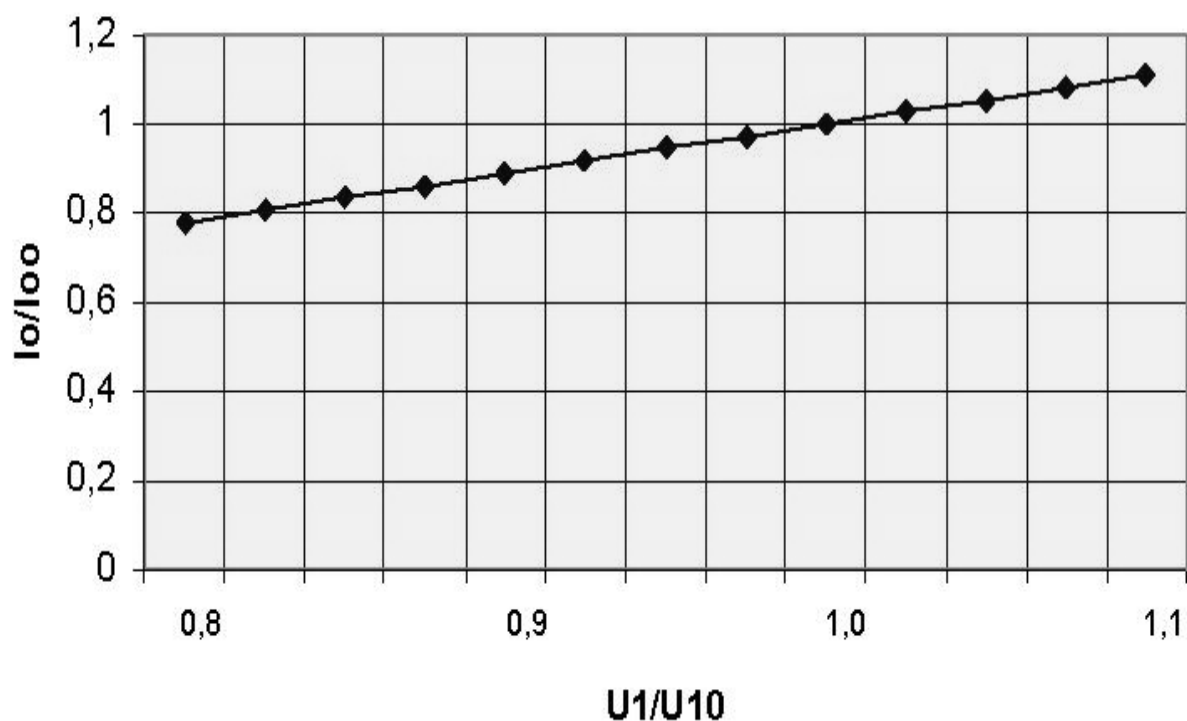


Рис.1.3 – Залежність  $P_0 = f(U_1)$

Таблиця 1.2 – Результати розрахунку статичних характеристик за різними каналами керуючих впливів

$T_2 = f(I_1)$	$T_3 = f(U_2)$	$T_4 = f(I_2)$
0,39	1,609792	1,844278
0,512	1,348462	1,630782
0,634	1,152465	1,457317
0,756	1,000022	1,313589
0,878	0,878068	1,192555
1	0,778288	1,089233
1,122	0,695137	1
1,244	0,624779	0,922159
1,366	0,564472	0,853659
1,488	0,512206	0,792913
1,61	0,466474	0,738676
1,732	0,426121	0,705635
1,854	0,390253	0,660136

На рис.1.4 представлені графічні ілюстрації всіх отриманих результатів розрахунку.

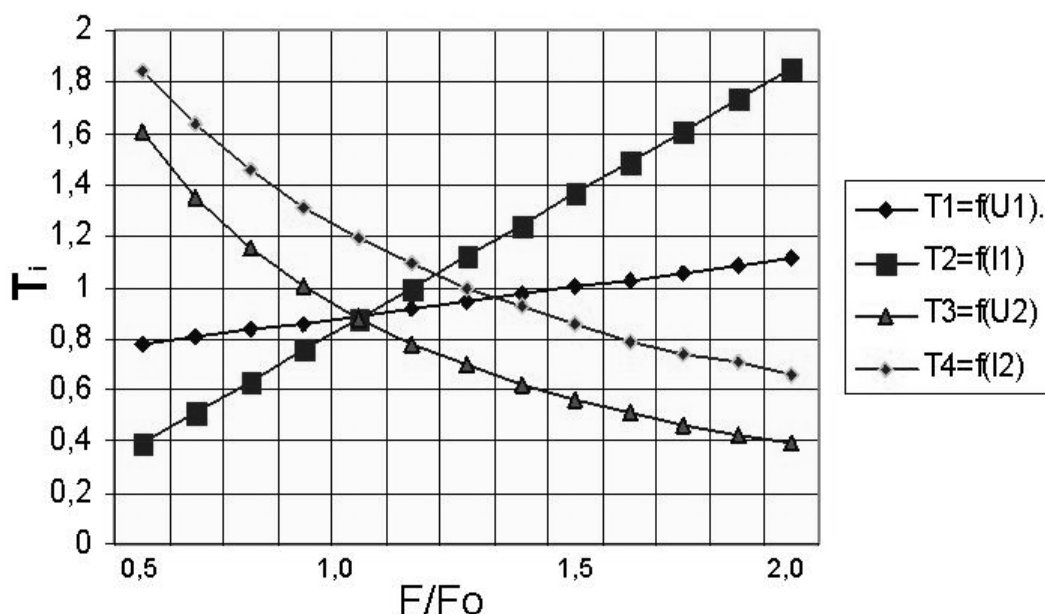


Рис.1.4 – Статичні характеристики теплового режиму ВА за різними каналами впливу

## 1.2. Аналіз моделі статички

Для зручності аналізу статичних залежностей усі величини на рис.1.4 наведені у відносних одиницях  $(T_i; \frac{F}{F_0})$ .

Порівнюючи статичні характеристики за розглянутими каналами впливу поблизу точки нормального режиму роботи ВА, користуючись величиною параметричної чутливості ТО (1.2), можна припустити, що нахили, а значить і

коефіцієнти передачі, відрізняються. Найбільшим коефіцієнтом підсилення володіє канал  $T_2 = f(I_1)$  – «струм джерела живлення - температура ВА». Характеристика  $T_1 = f(U_1)$  – «напруга джерела живлення - температура ВА» має істотно менший нахил. Коефіцієнти передачі каналів, які ілюстровані кривими  $T_3$  («напруга формувача потоку теплоносія - температура ВА») і  $T_4$  («струм формувача потоку теплоносія - температура ВА»), мають близькі й досить великі величини.

Проведений параметричний аналіз дозволяє рекомендувати канал  $T_2 = f(I_1)$  як найбільш ефективний. Однак у реальних умовах використання він впливає на тягові характеристики споживачів електроенергії, що живляться від локальної контактної мережі об'єкта. Очевидно, що для ефективного впливу на температурний режим ВА можна рекомендувати кожен з двох розглянутих каналів регулювання потоку теплоносія ( $T_3, T_4$ ). Такий варіант впливу на технологічний об'єкт може бути реалізований шляхом використання керованого електричного вентилятора або повітродувки відповідної потужності.

Оскільки нелінійності характеристик  $T_3, T_4$  мають тенденції виходу на пологі ділянки, то ці властивості кривих указують, що при визначених потоках теплоносіїв буде можливий перегрів ВА. Для виключення цього варто застосувати більш потужний або додатковий вентилятор, або припинити експлуатацію ВА в таких умовах за допомогою системи автоматичного відключення випрямляча.

З огляду на великий коефіцієнт передачі керуючої величини за каналом  $T_2$ , її варто стабілізувати для запобігання суттєвого впливу на температуру ВА.

*Висновки:* для розроблюваної системи автоматизації керування тепловим режимом випрямного агрегату мийно-прибирального корпусу статичні характеристики на різних каналах керування були отримані при використанні аналітичного методу моделювання технологічного процесу. На основі аналізу отриманих даних для забезпечення надійної експлуатації ВА в автоматичному режимі канал «напруга на двигуні вентилятора - температура випрямного агрегату» був обраний у якості головного керуючого впливу.

## **2. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ**

### **2.1. Аналітичне моделювання динаміки об'єкта керування**

*Динамічним режимом роботи* ТО називається перехідний режим, що настає після збурювання на вході об'єкта.

Динамічні властивості виражаються часовими характеристиками – функціональними залежностями між вхідними й вихідними величинами об'єкта в часі:

$$Y(t) = f[X(t)]. \quad (2.1)$$

Для розроблюваного випрямного агрегату доцільно застосувати аналітичний метод одержання динамічних характеристик.

Аналітичний підхід одержання еквівалентної моделі динаміки ВА може бути заснований на розгляді теплового балансу в ТО, що розкриває розподіл теплової енергії в елементах пристрою.

Аналогічний підхід використовувався при моделюванні і дослідженні статичного режиму ВА (розд.1), що дозволив визначити канал керування і параметри ТО, задовольняючі роботу його в точці « $T_0$ » (рис. 1.2) статичної характеристики, щодо якої можуть відбуватися припустимі зміни умов експлуатації в часі.

Математичний опис *об'єкта керування* (ОК) заснований на аналізі розрахункової схеми, що представляє лаконічне зображення конструктивних і технологічних особливостей ОК з погляду підтримки головного параметра і впливу на нього інших величин (рис. 2.1).

Основним рівнянням теплового перетворення для такого ОК буде рівняння теплового балансу, що відбиває постійну тепломісткість усередині умовного циліндра. Рівняння повинне відбивати умову, коли кількість теплоти, що надходить в одиницю часу від перетворювача 2, дорівнює кількості відданої теплоти в навколишнє середовище.

У розрахунковій моделі представлений варіант середовищ теплообміну, прийнятий на основі аналізу моделі статички ОК, що зумовило необхідність обліку визначених параметрів процесу ( $I_1, U_2$ ), і застосування змущеної конвекції повітря за допомогою вентилятора.

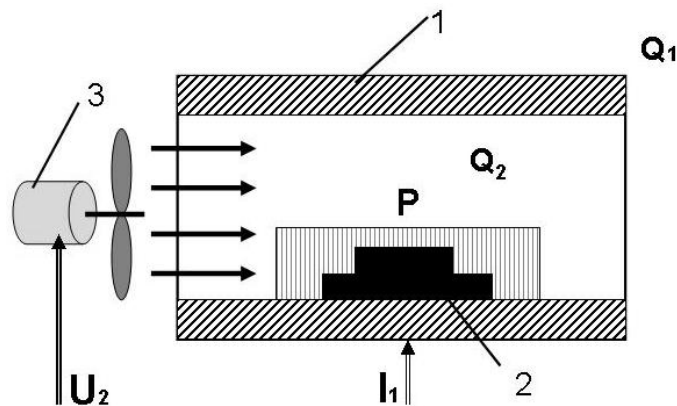


Рис. 2.1 – Схема об'єкта керування:

$I$  – умовний циліндр потоку теплоносія; 2 – нагрівальний елемент (напівпровідниковий діод); 3 – вентилятор;  $I_1, U_2$  – параметри, що впливають на теплообмін;  $P$  – виділена потужність;  $Q_1$  – температура навколишнього середовища;  $Q_2$  – температура нагрівача (напівпровідниковий діод).

Розглянемо шляхи витрати тепла від перетворювача для одержання наближеного рівняння розрахункової моделі процесу:

- теплоту, що виділяється в перетворювачі, або теплоту Джоуля - Ленца визначають, з огляду на параметри перетворювача ( $I$  – величина струму,  $R$  - опір елемента), за відомою формулою

$$q_i = k^2 R. \quad (2.2)$$

- тепловий потік  $q_0$ , що створений за рахунок різниць температур  $Q_1$  і  $Q_2$ , можна визначити за формулою

$$q_0 = G_v(Q_1 - Q_2), \quad (2.3)$$

де  $G_v$  - теплова провідність середовища (для повітря  $G_v = 0,043$ ).

Теплова провідність середовища залежить від теплопровідності повітря, обумовленою за довідковими даними, геометричних розмірів циліндра розрахункової моделі ( $d_i$  – габаритні розміри), властивостей матеріалів та ін.

- Тепловий потік  $q_m$  у результаті тепловіддачі визначається залежністю

$$q_m = \varepsilon S(Q_1 - Q_2), \quad (2.4)$$

де  $\varepsilon$  - коефіцієнт тепловіддачі,

$S$  – поверхня нагрітого тіла.

Коефіцієнт тепловіддачі  $\varepsilon$  для газів виражається за формулою

$$\varepsilon = \left( \frac{Vd}{\nu} \right)^n \cdot \frac{c\lambda}{d}, \quad (2.5)$$

де  $V$  – швидкість руху газу;

$d$  – діаметр циліндра;

$\nu$  - кінематична в'язкість, що дорівнює абсолютній в'язкості, віднесений до густини речовини;

$\lambda$  - теплопровідність газу;

$n, c$  – функції швидкості газу, визначені за критерієм Рейнольдса

$$(Re = \frac{Vd}{\nu}).$$

У розглянутому вираженні (2.4) можна відзначити, що величина  $\varepsilon$  пропорційна швидкості потоку. Оскільки розрахункова модель (рис.2.1) припускає використання вентилятора, то вивчення впливу швидкості повітряного потоку  $V$  на тепловіддачу середовища  $K_v$  у зоні перетворювача вважається важливим. Взаємозв'язок цих параметрів ілюструє крива, що зображена на рис.2.2 та запозичена з довідкових джерел.

Якщо не розглядати властивість тіл випромінювати і поглинати тепло, теплообмінні процеси в трансформаторі ВА та ін. фактори, то рівняння теплового балансу перетворювача при незмінних умовах на основі вищезазначених міркувань можемо записати у вигляді:

$$q_i = q_0 + q_m, \quad (2.6)$$

яке і відбиває витрату теплоти перетворювача тепловими потоками в результаті теплопровідності через сам перетворювач і навколишнє середовище.

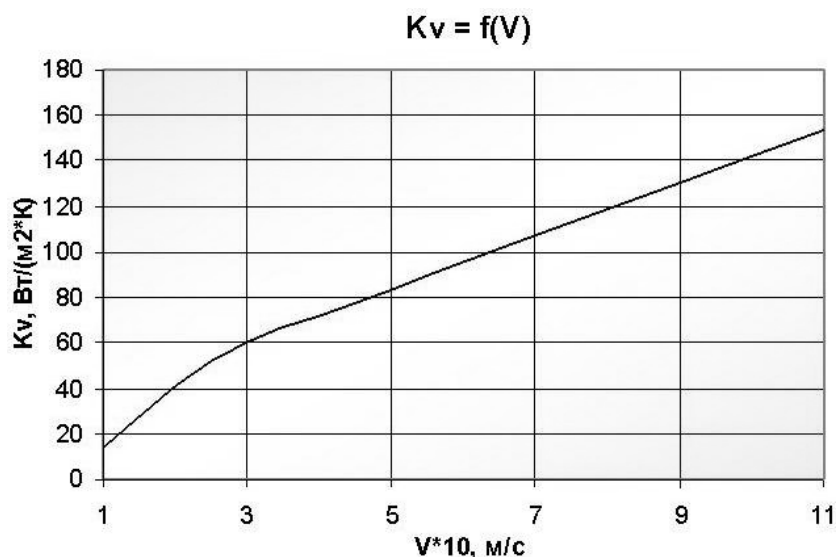


Рис. 2.2 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі від швидкості потоку

У прийнятій розрахунковій моделі (рис.2.1), можна відзначити, що перетворювач зі струмом, що протікає по ньому, одночасно проохолоджується його повітряним потоком, що обдуває. Оскільки ефект зносу теплоти в такому пристрої перевершує інші охолоджувальні фактори, то рівняння теплового балансу можна показати у вигляді:

$$k^2 R - G_v(Q_1 - Q_2) - K_v S(Q_1 - Q_2) = 0, \quad (2.7)$$

або

$$kI^2 R - G_v(Q_1 - Q_2) - K_v \left( \frac{Vd}{v} \right)^n \cdot \frac{c\lambda}{d} \cdot S(Q_1 - Q_2) = 0, \quad (2.8)$$

$$kI^2 R - \left[ G_v + K_v \left( \frac{Vd}{v} \right)^n \cdot \frac{c\lambda}{d} \cdot S \right] \cdot (Q_1 - Q_2) = 0. \quad (2.9)$$

Регулярний тепловий режим у такому ОК можна представити залежністю, що відбиває акумулювання тепла в розглянутих середовищах при зміні температури перетворювача:

$$(mC) \left( \frac{d[Q_1 - Q_2(t)]}{dt} \right) + A[Q_1 - Q_2(t)] = kI^2(t)R, \quad (2.10)$$

$$A = G_v + K_v (Re)^n \cdot \frac{c\lambda}{d} \cdot S,$$

де  $m$  – маса перетворювача (активний елемент і радіатор);

$C$  – теплоємність перетворювача.

Дане вираження перетворення тепла відповідає рівнянню аперіодичної ланки:

$$\frac{Td(\Delta Q)}{dt} + A\Delta Q = \Delta P, \quad (2.11)$$

де  $P$  – потужність, що витрачається на тепло;

$$\Delta Q = \frac{Q_1 + Q_2}{2},$$

а в операторній формі (2.11) запишеться у вигляді

$$W(p) = \frac{\Delta Q(p)}{\Delta P(p)} = \frac{K}{Tp + 1}. \quad (2.12)$$

Коефіцієнт підсилення  $K$  визначиться за формулою

$$K = A = G_v + K_v(Re)^n \cdot \frac{c\lambda}{d} \cdot S, \quad (2.13)$$

а постійна часу  $T$  –

$$T = \frac{mC}{A} = \frac{mC}{G_v + K_v(Re)^n \cdot \frac{c\lambda}{d} \cdot S}. \quad (2.14)$$

Для розрахунку параметрів динамічної ланки були прийняті наступні вихідні величини, що відповідають нормальному режимові експлуатації пристрою (табл.Д1, табл.Д3):  $\Delta P_0 = 1800 \text{ Вт}$ ;  $m = 0,1 \text{ кг}$ ;  $C = 400 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $G_v = 0,043$ ;  $d = 0,15 \text{ м}$ ;  $Re = 87$ ;  $S = 0,01 \text{ м}^2$ . Значення коефіцієнтів  $n$ ,  $c$ ,  $v$ ,  $\lambda$  вибиралися з довідкових таблиць (табл.2.1, 2.2), а  $K_v$  визначався в залежності від застосовуваного типу вентилятора за величиною  $V$  (рис.2.2).

Таблиця 2.1 – Фізичні параметри сухого повітря

$\Delta Q, ^\circ\text{C}$	$v \cdot 10^{-3}, \text{ м}^2/\text{с}$	$\lambda \cdot 10^{-2}, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$
0	1,37	2,33
20	1,57	2,56
100	2,378	3,02
500	8,040	5,46

Таблиця 2.2 – Визначення функцій швидкості сухого повітря

$Re$	$c$	$n$
5-80	0,93	0,40
80 – $5 \cdot 10^2$	0,715	0,46
... $5 \cdot 10^3$	0,226	0,60

Таким чином, були отримані наступні вирази для визначення основних параметрів динамічної ланки (2.12):

$$K = 0,043 + 140 \cdot 87^{0,46} \cdot \frac{c\lambda}{d} \cdot S; \quad (2.15)$$

$$T = \frac{mC}{0,043 + 140 \cdot 87^{0,46} \cdot \frac{c\lambda}{d} \cdot S}. \quad (2.16)$$

Для розглянутого варіанта розрахункової динамічної моделі випрямляча передатні функції мають такий вигляд для різних умов охолодження перетворювача:

- примусовим потоком повітря при  $V = 100 \text{ м/с}$

$$W_1(p) = \frac{4,303}{1 + 9,296p}; \quad (2.17)$$

- природною конвекцією повітря ( $V \sim 0 \text{ м/с}$ ;  $K_v \approx 10 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ ),

$$W_2(p) = \frac{0,722}{1 + 55,43p}. \quad (2.18)$$

## 2.2. Визначення перехідних характеристик і їх аналіз

Отримані передатні функції (2.17, 2.18) використовуємо для дослідження перехідних процесів в ОК. Класичний метод перебування перехідних характеристик полягає в рішенні рівнянь при нульових початкових умовах  $Y_{вих}(0) = 0$  з урахуванням таблиць оригіналів і зображень за Лапасом.

Для вихідного рівняння

$$(Tp + 1)Y_{вих}(p) = Kn, \quad (2.19)$$

його оригінал запишеться у вигляді

$$Y_{вих} = \frac{Kn}{T} \cdot \exp\left(-\frac{t}{T}\right). \quad (2.20)$$

З огляду на умови експлуатації пристрою, вираження (2.20) представимо наступною залежністю:

$$Y_{вих}(t) = Q_2 + (Q_1 - Q_2) \cdot \frac{K}{T} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right)\right). \quad (2.21)$$



$$Y_{вих}(t) = 75 + (20 - 75) \cdot \frac{4,3}{9,3} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{9,3}\right)\right).$$

Використовуючи прийняті раніше нульові умови, за (2.21) були розраховані значення  $Y_{вих1}(t)$  і  $Y_{вих2}(t)$  (табл. 2.3).

Згідно з даними табл. 2.3 побудовані часові характеристики ОК при збурюванні за каналом «швидкість потоку повітря–температура перетворювача» ( $Y_{вих1}(t)$  – умова примусового охолодження при  $V = 100$  м/с, рис. 2.3;  $Y_{вих2}(t)$  – природне охолодження конвекцією повітря при  $V = 0$  м/с, рис. 2.4).

Таблиця 2.3 – Розрахунок перехідних характеристик

№ п/п	$t, c$	$Y_{вих1}(t)$	$t, c$	$Y_{вих2}(t)$
1	0	75	0	75
2	3	67,97788	20	74,7041
3	6	62,89262	40	74,49783
4	9	59,20999	60	74,35404
5	12	56,54312	80	74,2538
6	15	54,61183	100	74,18392
7	18	53,21323	120	74,1352
8	21	52,2004	140	74,10125
9	24	51,46693	160	74,07757
10	27	50,93577	180	74,06107
11	30	50,55112	200	74,04957
12	33	50,27256	220	74,04155
13	36	50,07083	240	74,03596
14	39	49,92475	260	74,03206
15	42	49,81896	280	74,02934
16	45	49,74235	300	74,02745
17	48	49,68686	320	74,02613
18	51	49,64669	340	74,02521
19	54	49,61759	360	74,02457
20	57	49,59652	380	74,02412

Поводження характеристик перехідних процесів дозволяють зробити висновок, що використання вентилятора суттєво прискорює процес охолодження перетворювача, скорочуючи його тривалість приблизно у 8 разів. Очевидно, що застосування вентилятора недоцільно в безперервному режимі обдуву перетворювача, а переважно при температурах, що перевищують номінальні умови експлуатації випрямного пристрою.

Оскільки при моделюванні динаміки отримана перехідна характеристика, на рис. 2.3 проілюстровано вплив природної конвекції на процес охолодження випрямляча, то облік температури навколишнього середовища є важливим чинником при формуванні керуючого сигналу в САР.

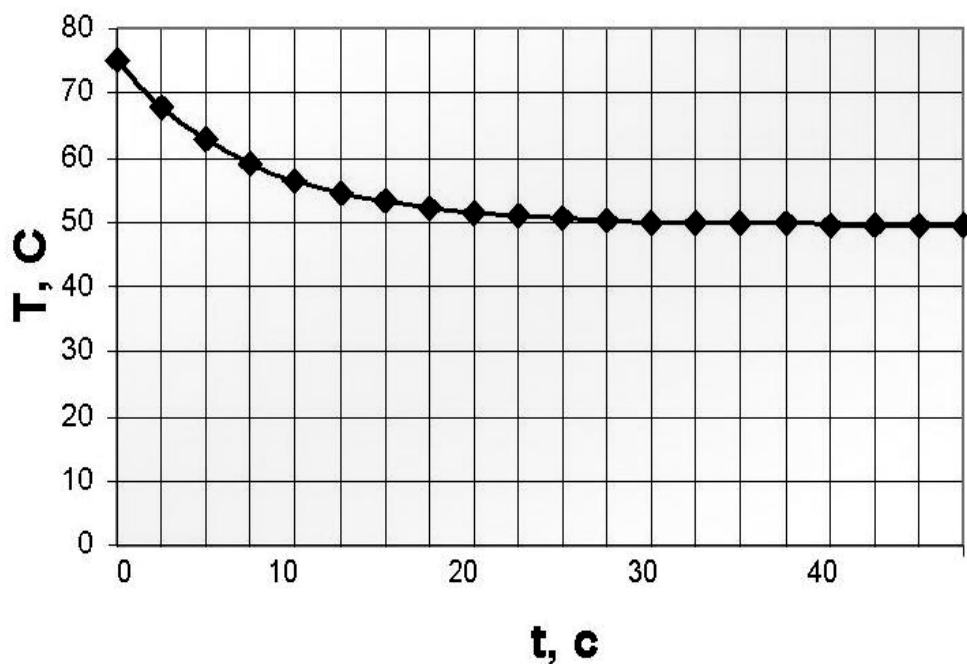


Рис. 2.3 – Перехідна характеристика по каналу  
«потік повітря - температура перетворювача»

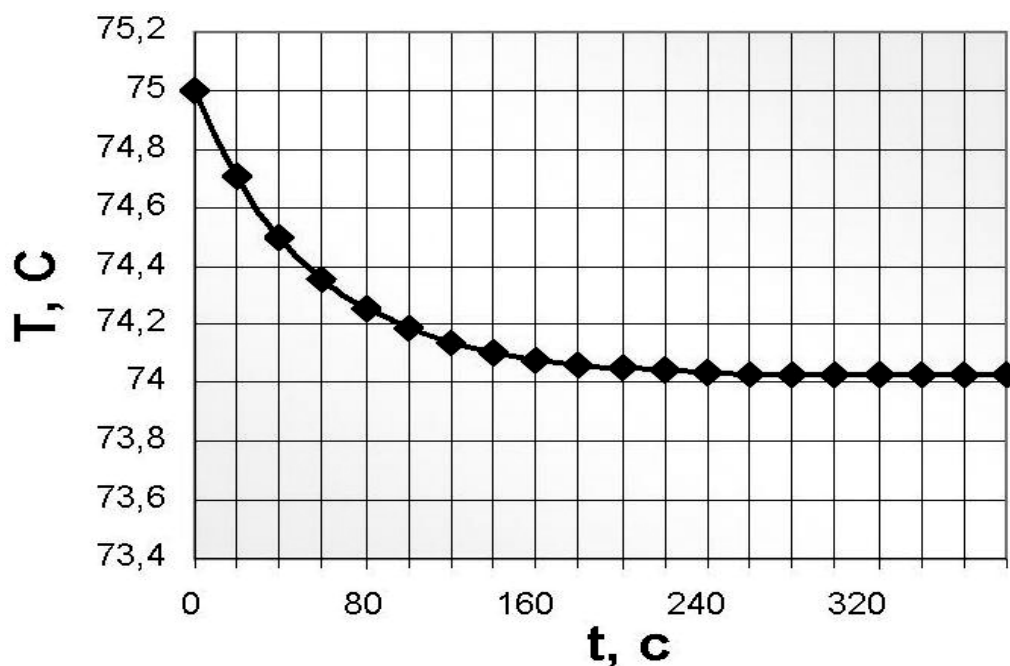


Рис.2.3 – Перехідна характеристика по каналу  
«конвекція повітря - температура перетворювача»

*Висновки:* при синтезі системи автоматики для випрямного агрегату важливо враховувати не тільки температуру самого перетворювача, але і температуру навколишнього середовища. Даний висновок, очевидно, поширюється на всі аналогічні об'єкти керування. Передатні функції, отримані аналітичним шляхом, придатні для вивчення стійкості ОК.

### 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБ'ЄКТА

#### 3.1. Синтез системи автоматичного регулювання

При дослідженні статистики процесу охолодження ВА були вивчені основні фактори, що впливають на нагрівання випрямного пристрою при його експлуатації. Результати аналізу варіацій декількох змінних дозволили як основну керуючу величину вибрати потік охолодного повітря, створюваного електричним вентилятором.

Вивчення динамічної моделі процесу підтвердило правильність вибору керуючої величини і дозволило кількісно визначити її вплив на процес теплообміну в зоні розміщення напівпровідникового випрямного елемента. Крім того, було виявлено, що процес теплообміну суттєво залежить від різниці температур перетворювача і зовнішнього середовища.

Оскільки тепловий режим роботи випрямляча залежить від навантаження у контактній мережі (КМ), то для забезпечення інваріантості його від струму в КМ необхідно потужність навантаження стабілізувати і підтримувати в номінальних параметрах.

Таким чином, для вирішення поставленої задачі варто забезпечити стабілізацію струму в КМ, а для своєчасного вмикання і керування примусовим обдувом перетворювача - забезпечити контроль температури не тільки перетворювача, але і навколишнього середовища.

Виходячи з формулювання висновків, можна зробити висновок, що для автоматизації ОК необхідно розробити наступні локальні системи автоматичного регулювання (САР): вихідної потужності ВА,  $I_1$ ; потоку охолодного повітря залежно від різниці температур навколишнього середовища  $Q_1$  і перетворювача  $Q_2$ .

#### 3.2. Розробка функціональної схеми САР

Функціональна схема пропонованої автоматичної системи керування тепловим режимом випрямного агрегату наведена на рис.3.1

При розробці таких схем варто враховувати наявні на об'єкті щити керування і пульти операторів. Можливе використання наявного устаткування для розміщення нових технічних рішень може знизити розміри фінансування засобів автоматизації. Крім того, при наявності локальної комп'ютерної мережі (ЛКМ) на підприємстві, доцільно передбачити організацію передачі даних про роботу САР на диспетчерський й інші пункти, де збір і збереження аналогічної інформації здійснюють сервери.

Функціональна схема керування теплообміном випрямного агрегату мийно – прибирального корпусу містить дві локальні САР.

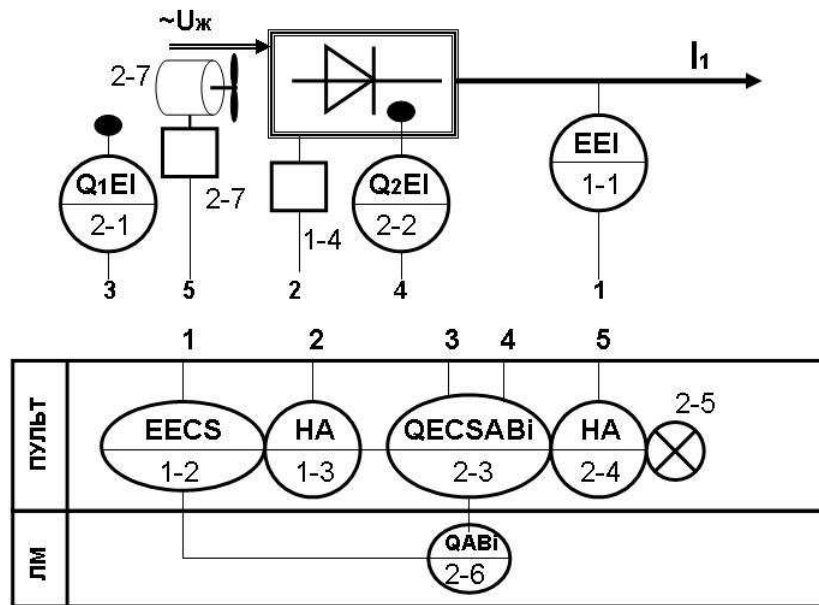


Рис. 3.1 – Функціональна схема системи керування терморежимом випрямного агрегату мийно-прибирального корпусу

Система стабілізації вихідної потужності ВА в залежності від струму в КМ містить у собі: датчик струму з перетворювачем 1-1, блок обробки даних вимірів з пристроєм формування сигналу керування випрямлячем 1-2 і виконавчий пристрій 1-4. У системі передбачене також ручне керування ВА з пульта кнопками 1-3.

Система примусового обдуву перетворювача ВА містить у собі: датчики температури навколишнього середовища 2-1 і перетворювача ВА 2-2, блок 2-3 обробки вихідних даних і формування керуючого сигналу, що надходить на виконавчий механізм 2-7 на базі електричного вентилятора. Ця САР оснащена кнопками ручного керування 2-4, розміщеними на пульті оператора, зі світловою сигналізацією 2-5. Для передачі даних про роботу САР у локальну комп'ютерну мережу блок 2-3, оснащений додатковим цифровим перетворювачем (наприклад, аналого-цифровий перетворювач).

Оскільки між розглянутими величинами існує тісний взаємозв'язок, який підтверджується і результатами моделювання статистики і динаміки ОК, то обидва ці контури на схемі електрично взаємозалежні.

При розробці даної системи автоматизації варто врахувати існуючі взаємозв'язки ОК з іншими системами керування, блокування, автоматичного вимикання, сигналізації та ін., тому що запропоноване технічне рішення не повинне порушити технологічні процеси у взаємозалежних між собою технологічних об'єктах.

Головною особливістю існуючих систем автоматики є спільне використання контактно – релейних, аналогових, цифрових і мікропроцесорних пристроїв. Очевидно, що взаємодія таких неідентичних технічних рішень на об'єктах керування вимагає від розроблювачів систем автоматики особливої уваги до кожного з них.

## 4. РОЗРАХУНОК І РОЗРОБКА КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

### 4.1. Розробка структурної схеми контуру регулювання

При аналізі функціональної схеми (рис.3.1) очевидно, що за структурою реалізації запропоновані контури регулювання неоднакові. Основний контур керування потоком охолодженого повітря містить два приймальні елемента, досить складний проміжний елемент і виконавчий пристрій.

З огляду на функціональні вимоги до розглянутих елементів, структурну схему контуру регулювання (2) «різниця температур – потік охолодженого повітря» можна представити в розгорнутому вигляді (рис.4.1.1).

На схемі умовно зображені компоненти пристрою, що складають другий контур керування.

Параметрами датчиків температури  $t_1$ ,  $t_2$  є величини їхніх опорів  $R_1$ ,  $R_2$ . Перетворювачі цих величин в електричні сигнали  $R_1/E_1$ ,  $R_2/E_2$  підключені до відповідних формувачів нормованих рівнів інформаційних сигналів  $E_1/U_1$ ,  $E_2/U_2$ .

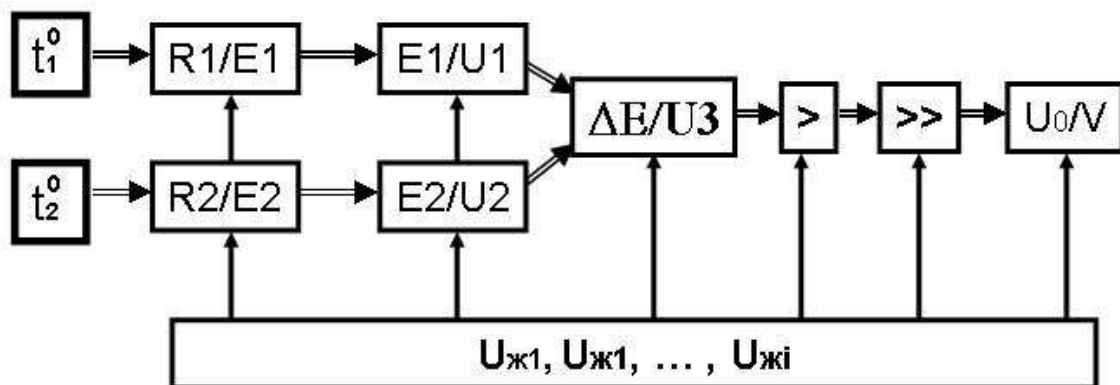


Рис. 4.1.1 – Структурна схема другого каналу керування

Далі уніфіковані сигнали обробляються в обчислювальному пристрої і на основі логічних операцій виконується формування керуючого сигналу  $U_3$ . При необхідності керуючий сигнал підсилюється, нормується і подається на виконавчий пристрій  $U_0/V$  з рівнями напруги  $U_0$  передбаченими технічними умовами експлуатації електродвигуна вентилятора.

Оскільки для реалізації схеми застосовують різну елементну базу, то для надійної роботи всіх компонентів завжди потрібні роздільні джерела живлення  $U_{жі}$ . Наприклад, для вимірювальної схеми прийомного елемента часто використовують стабілізоване джерело живлення напругою  $5B$ , а для виконавчого елемента потрібно –  $24, 36, 110, 220, 380 B$  та ін., розрахований на великі навантаження.

## 4.2. Розрахунок і розробка вимірювальної схеми РО

Для контролю температури, тиску, рівнів рідини, освітленості й інших параметрів на технологічних об'єктах часто застосовують резистивні датчики – перетворювачі. До їх числа відносяться всі термометри опору, фоторезистори, резистивні датчики тиску та ін. Для перевірки своїх знань з радіоелементів необхідно скористатися додатком «Test» програми SinSys (<Bxi>, <TEST>).

Вихідною величиною таких прийомних елементів є опір датчика, що залежить від контрольованої фізичної величини. Для формування інформаційного електричного сигналу використовуються вимірювальні мостові схеми, в яких одне з пліч включається резистивний датчик – перетворювач.

На рис. 4.2.1 представлена схема неврівноваженого вимірювального мосту. Приймний елемент ( $R_T$ ) розміщується в одному з його пліч.

Схема живиться від стабілізованого джерела живлення  $U$  (табл.Д3), підключеного до однієї діагоналі моста, а вихідний сигнал моста  $U_{вих}$  контролюється в другій його діагоналі.

Відомо, що неврівноважені мости при мінімальному припустимому значенні величини  $R_T = R_{min}$  урівноважені, а їхній вихідний сигнал  $U_{вих}$  при цьому дорівнює нулю.

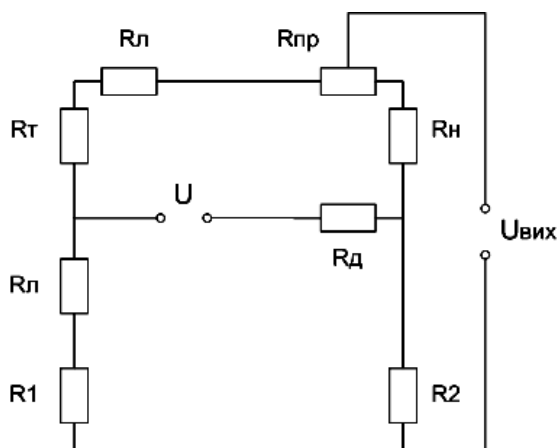


Рис. 4.2.1 – Схема вимірювального мосту з резистивним датчиком:

$R_T$  – резистивний датчик;  $R_1$ ,  $R_2$  – баластові резистори (плечі) вимірювального мосту;

$R_l$  – опір ліній зв'язку,  $R_d$  – додатковий резистор,  $R_{np}$  – резистор регулювальний;

$U$  – джерело живлення;  $U_{вих}$  – вихідний сигнал.

Усі зміни імпедансу датчика  $R_T$ , що є функцією контрольованого параметра, приведуть до зміни струму в плечах моста, а інформаційний сигнал  $U_{вих}$ , взаємозалежний з кількісною оцінкою контрольованого параметра, буде відрізнятися від нуля, що відображається залежністю:

$$\begin{aligned} R_T &= f(P), \\ U_B &= f(R_T). \end{aligned} \quad (4.2.1)$$

Для розрахунку вимірювальної схеми неврівноваженого моста необхідно спочатку визначити величини баластових резисторів ( $R_1 = R_2$ ). За градууювальною таблицею резистивного датчика знаходять  $R_{T\min}$  і  $R_{T\max}$  і розраховують шукану величину:

$$R_1 = R_{T\min} + R_{\text{Л}} + \frac{(R_{T\max} - R_{T\min})}{2} + \frac{(R_{T\max} - R_{T\min})}{4}. \quad (4.2.2)$$

При  $R_{T\max} = 200$  Ом,  $R_{T\min} = 100$  Ом,  $R_{\text{Л}} = 5$  Ом одержимо

$$R_1 = R_2 = 100 + 5 + \frac{(200 - 100)}{2} + \frac{(200 - 100)}{4} = 180 \text{ Ом.}$$

Головною умовою рівноваги моста є рівність протилежних пліч, що можна представити наступною залежністю:

$$R_2(R_T + R_{\text{Л}}) = (R_1 + R_{\text{Л}})(R_H + R_{np}). \quad (4.2.3)$$

Рівняння рівноваги мосту при нижньому рівні вимірюваного параметра має вигляд:

$$R_2(R_{T\min} + R_{\text{Л}} + R_{np}) = (R_1 + R_{\text{Л}})R_H, \quad (4.2.4)$$

Вибір величини резистора  $R_{np}$  дозволяє визначити верхню межу інтервалу вимірюваної величини. Розрахунок цього резистора з урахуванням інтервалу варіювання параметра  $R_T$  визначається за формулою:

$$R_{np} = R_2 \frac{R_{T\max} - R_{T\min}}{R_1 + R_2 + R_{\text{Л}}}. \quad (4.2.5)$$

Величину резистора початку шкали вимірюваного параметра  $R_H$  розраховують за формулою

$$R_H = R_2 \frac{R_{T\min} + R_{\text{Л}} + R_{np}}{R_1 + R_{\text{Л}}}. \quad (4.2.6)$$

Максимальну силу струму  $I_{T\max}$  через датчик, відповідно до технічних умов його експлуатації, можна вибрати, розрахувавши величину додаткового резистора  $R_{\delta}$  у діагоналі мосту з джерелом живлення, використовуючи залежність:

$$I_{T\max} = \frac{U_{\min}}{R_{T\min} + R_{\text{Л}} + R_{np} + R_H + R_{\text{Д}}}, \quad (4.2.7)$$

звідки можемо записати, що

$$R_D = \frac{U_{min}}{I_{T_{max}}} - (R_{T_{min}} + R_L + R_{np} + R_H). \quad (4.2.8)$$

У табл. 4.2.1 наведені технічні характеристики випуску серійно мідних (ТСМ) і платинових (ТСП) терморезисторів.

Таблиця 4.2.1 – Технічні характеристики термоперетворювачів

Тип датчика	Робочий діапазон, °С.	$R_0$ (0°С), Ом	$I_{T_{max}}$ , мА	Межа припустимих відхилень, °С, dT	Коефіцієнт $W_0$
ТСМ-50М	-50...120	50	5	+/- (0,15 – 0,002t)	1,428
ТСМ-100М	-50...180	100	5	+/- (0,25 – 0,0035t)	1,428
ТСП-Pt100	0...100	100	1	+/- (0,10 – 0,001t)	1,385
ТСП-Pt1000	-30...350	180	1	+/- (0,15 – 0,002t)	1,385
ТСП-50П	-196...600	50	5	+/- (0,30 – 0,005t)	1,391

Використовуючи дані табл.4.2.1, визначають величини  $R_{T_{min}}$  і  $R_{T_{max}}$  :

$$R_{T_{min}} = R_0;$$

$$R_{T_{max}} = R_0 + \frac{R_0}{W_0} \cdot \frac{t_{max}}{100}. \quad (4.2.9)$$

Для резистивного датчика з інтервалом вимірюваних температур від 0°С до +100°С знаходимо:

$$R_{T_{min}} = R_0 = 100 \text{ Ом};$$

$$R_{T_{max}} = 100 + \frac{100}{1,428} \cdot \frac{100}{100} = 170 \text{ Ом}.$$

Якщо робочі температури датчика лежать в інтервалі від -50°С до 0°С:

$$R_{T_{max}} = R_0 = 100 \text{ Ом};$$

$$R_{T_{min}} = 100 + \frac{100}{1,428} \cdot \frac{-50}{100} = 65 \text{ Ом}.$$

У табл. 4.2.2 наведені результати розрахунку параметрів неврівноваженого мосту з використанням технічних характеристик конкретного резистивного датчика.



Таблиця 4.2.2 – Результати розрахунку параметрів вимірювальної схеми

$I_T \cdot 10^{-3},$ А	$U, В$	$R_{Tmin},$ ОМ	$R_{Tmax},$ ОМ	$R_L,$ ОМ	$U_{Bmin},$ В	$U_{Bmax},$ В	$R1 = R2,$ ОМ	$R_{ex},$ ОМ	$R_L,$ ОМ	$dU_{ex},$ В
7,5	5,3	100	200	5	0,2270	0,7215	180	400	399,5	0,4945

### 4.3. Розрахунок і розробка формувача уніфікованого сигналу

Вихідний сигнал вимірювальної схеми (рис.4.2.1) залежить від опору датчика, величина якого змінюється при змінах, наприклад, температури навколишнього середовища. Оскільки вимірювальні схеми формують різні за рівнем вихідні сигнали, то для їхнього застосування в діючих або створюваних системах автоматики потрібен додатковий пристрій, за допомогою якого вихідний сигнал буде змінюватися в нормованих межах.

Принцип уніфікації полягає у використанні технічних засобів, що дозволяють формувати інформаційні сигнали в строго заданих інтервалах, наприклад,  $\pm 1,25; 2,5; 5,0; 10 В$ .

Для уніфікації сигналів вимірювальних схем застосовують підсилювачі з визначеними коефіцієнтами підсилення, що забезпечують нормалізацію сигналів від будь-яких прийомних елементів.

Для формування уніфікованого сигналу часто використовують операційні підсилювачі.

Операційний підсилювач (ОП) – це інтегральний напівпровідниковий елемент, що застосовується для посилення, перетворення й обробки аналогових сигналів. Прикладом такого пристрою може бути двохкаскадний підсилювач, який проілюстрований на рис.4.3.1.

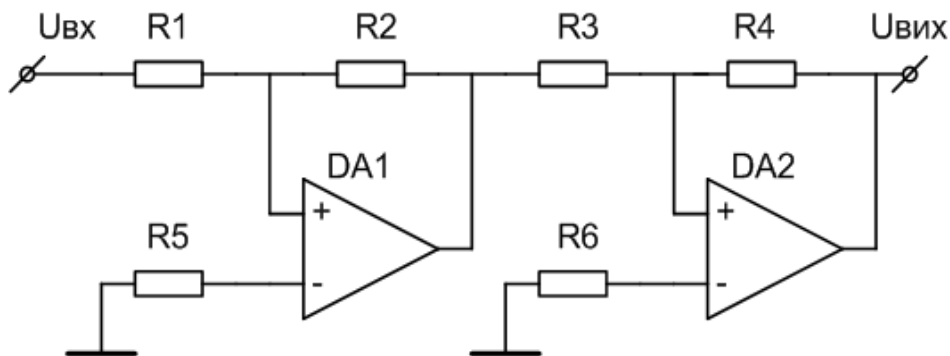


Рис. 4.3.1 – Схема двохкаскадного підсилювача:

$DA1, DA2$  – операційні підсилювачі;  $R1 - R6$  – зовнішні елементи.

Підключивши вхід даного пристрою  $U_{ex}$  до виходу вимірювальної схеми, підсилювач забезпечить ріст рівня інформаційного сигналу до необхідної величини. Вхідний опір, наприклад операційного підсилювача  $DA1$ ,

визначається величиною  $R1$ . Для узгодження з вимірювальною схемою, очевидно, що  $R1$  повинно визначатися величиною вихідного опору неврівноваженого моста  $Rm$ .

Передаточна функція ОП має вигляд:

$$U_{вих} = Kn(p)U_{вх} + U_{0вх}, \quad (4.3.1)$$

де  $U_{вих}$  - вихідний сигнал ОП;

$Kn(p)$  – коефіцієнт підсилення;

$U_{вх}$  – вхідний сигнал;

$U_{0вх}$  – рівень вхідного сигналу на частоті  $\omega=0$ .

У першому наближенні величина  $Kn(p)$  визначається залежністю:

$$Kn(p) = \frac{R2}{R1} \cdot \frac{Ky}{1 + Ky}; \quad (4.3.2)$$

$$A = \frac{1}{1 + \frac{R2}{R1} + \frac{R2}{R0}}; \quad (4.3.3)$$

$$U_{0вих} \sim \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \cdot U_{0вх}, \quad (4.3.4)$$

де  $Ky, A$  – параметри ОП.

Очевидно, що посилення ОП істотно залежить від співвідношення величин резисторів  $R1$  і  $R2$ . Зневажаючи дрейфом нуля підсилювача, з яким у прямої залежності знаходиться резистор  $R2$ , необхідний коефіцієнт ОП обирається за величиною цього елемента ( $R2$ ).

У розглянутому пристрої, очевидно, варто вибрати параметри резисторів  $R2, R4$  для досягнення необхідного результату.

Задаємося уніфікованим рівнем вихідного сигналу підсилювача  $U_{вих\max}$  і визначаємо параметри  $R2, R4$  при:

$$R1 = R_{вх} = 400 \text{ Ом}; U_{вх} = dU_{вих} = 0,4945 \text{ В}; U_{вих\max} = +5 \text{ В}.$$

Результати розрахунку, виконані за допомогою програми «*ПрЭ-2УН*» у пакеті *SinSys*, наведені в табл. 4.3.1.

Використовуючи *Windows*-додаток *MS Excel*, отримані дані були оброблені з урахуванням варіювання вхідної величини обумовленої коефіцієнтом  $d$  (табл. 4.3.1), тому що  $dU_{вх} = f(d)$ . Отримані результати обробки даних представлені на рис. 4.3.2.

Криві на рис. 4.3.2 ілюструють інтервал варіювання вихідного сигналу розробленого приладу, до складу якого входять резистивний датчик–перетворювач і підсилювач–нормалізатор на базі операційних інтегральних схем. Розрахунок помилок таких пристроїв представлений у [1].

На рис. 4.3.3 наведена загальна схема розробленого приймального елемента. Призначення всіх компонентів у схемі було розглянуто в розд. 4.2 і 4.3. Резистори  $R_{11} - R_{14}$  після розрахунку величин  $R_2$ ,  $R_4$  (табл. 4.3.1) вибираються з таблиць, що визначають номенклатуру їхнього промислового випуску відповідно до індексів рядів значень (табл. 4.3.2).

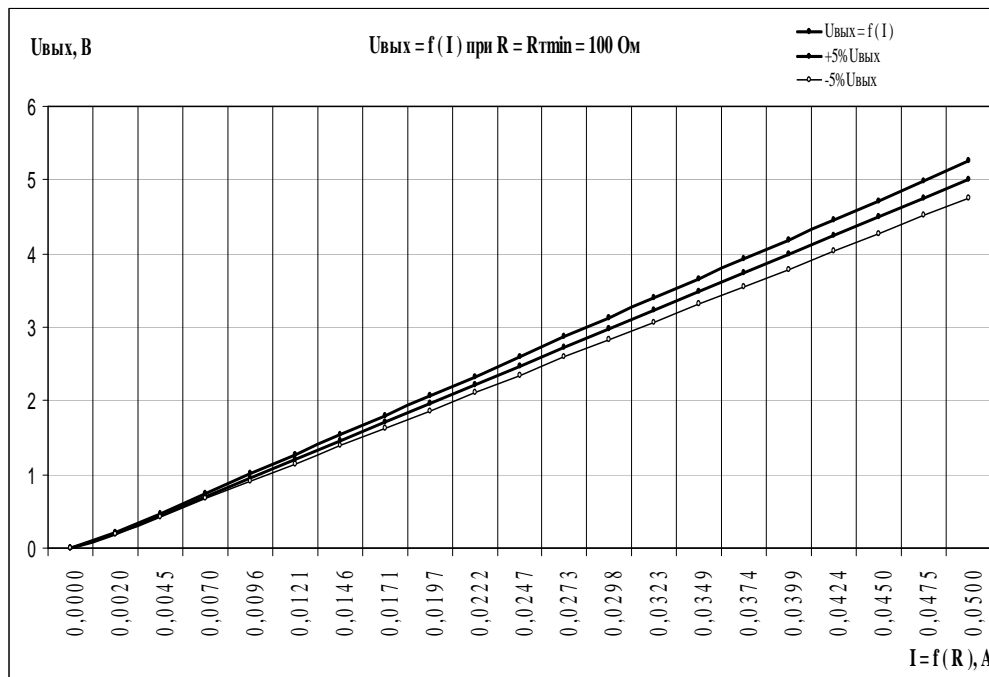


Рис. 4.3.2 – Залежність вихідного сигналу датчика – перетворювача

Таблиця 4.3.1 – Результати розрахунку операційного підсилювача

$dU_{вх}$ , мВ	$R_1 = R_{вух}$ Ом	$R_2$ кОм	$R_4$ кОм	$R_5 = R_{вух}$ Ом	$K_{yc1}$	$K_{yc2}$	$K_{yc}$	$U_{вух}$ , В
0,4945	400	859,2	861,5	400	1,9462	2,0784	4,0449	5,0025
0,4695	400	859,2	861,5	400	1,9462	2,0784	4,0449	4,7496
0,4445	400	859,2	861,5	400	1,9462	2,0784	4,0449	4,4967
0,4195	400	859,2	861,5	400	1,9462	2,0784	4,0449	4,2438
0,3945	400	859,2	861,5	400	1,9462	2,0784	4,0449	3,9909
0,3695	400	859,2	861,5	400	1,9462	2,0784	4,0449	3,738
0,3445	400	859,2	861,5	400	1,9462	2,0784	4,0449	3,4851
0,3195	400	859,2	861,5	400	1,9462	2,0784	4,0449	3,2322
0,2945	400	859,2	861,5	400	1,9462	2,0784	4,0449	2,9793
0,2695	400	859,2	861,5	400	1,9462	2,0784	4,0449	2,7264
0,2445	400	859,2	861,5	400	1,9462	2,0784	4,0449	2,4734
0,2195	400	859,2	861,5	400	1,9462	2,0784	4,0449	2,2205
0,1945	400	859,2	861,5	400	1,9462	2,0784	4,0449	1,9676
0,1695	400	859,2	861,5	400	1,9462	2,0784	4,0449	1,7147

$dU_{\text{вх}},$ мВ	$R_1 = R_{\text{вх}}$ Ом	$R_2$ кОм	$R_4$ кОм	$R_5 = R_{\text{вх}}$ Ом	$K_{\text{yc1}}$	$K_{\text{yc2}}$	$K_{\text{yc}}$	$U_{\text{вх}},$ В
0,1445	400	859,2	861,5	400	1,9462	2,0784	4,0449	1,4618
0,1195	400	859,2	861,5	400	1,9462	2,0784	4,0449	1,2089
0,0945	400	859,2	861,5	400	1,9462	2,0784	4,0449	0,956
0,0695	400	859,2	861,5	400	1,9462	2,0784	4,0449	0,70309
0,0445	400	859,2	861,5	400	1,9462	2,0784	4,0449	0,45018
0,0195	400	859,2	861,5	400	1,9462	2,0784	4,0449	0,19727
0	400	859,2	861,5	400	1,9462	2,0784	4,0449	0

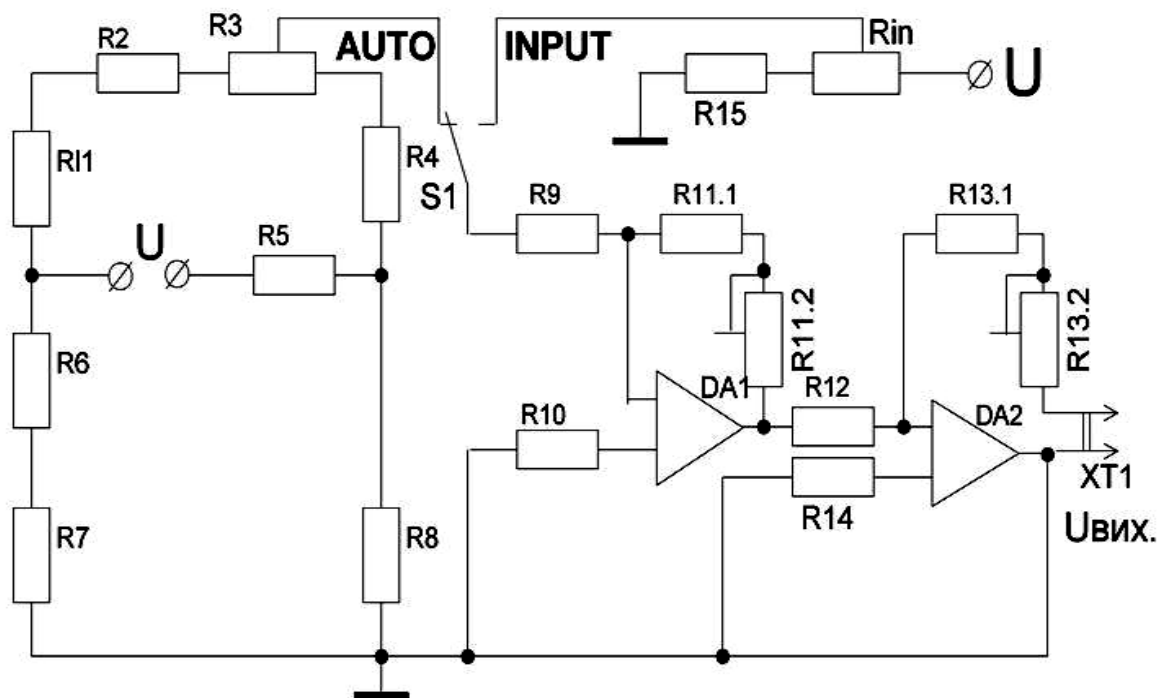


Рис. 4.3.3 – Схема перетворювача «температура – напруга»

Роз'єм XT1 на схемі призначений для виводу уніфікованого сигналу  $U_{\text{вих}}$ .

Величина  $U$ , згідно з даними в табл.4.2.2, дорівнює 5,3 В (табл.Д3).

Для живлення операційних підсилювачів потрібне джерело напруги відповідно до технічних характеристик мікросхем, обраних для реалізації пристрою.

Таблиця 4.3.2 – Ряди номінальних величин опорів резисторів і ємностей конденсаторів загального застосування

Ряд величин	Номінальні значення (одиниці, десятки Ом, кОм, МОм, ГОм, пФ,мкФ,Ф)						Припустимі відхилення від номінального значення, %
E6	1	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	+/-20
E12	1	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	+/-10
	1,2	1,8	2,7	3,9	5,6	8,2	+/-10
E24	1	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	+/-5
	1,1	1,6	2,4	3,6	5,1	7,5	+/-5
	1,2	1,8	2,7	3,9	5,6	8,2	+/-5
	1,3	2	3	4,3	6,2	9,1	+/-5

Для більшості аналогових інтегральних мікросхем звичайно потрібне джерело живлення напругою  $\pm 6,3B$ ;  $\pm 12,6B$ ;  $\pm 15B$ ;  $5 \div 6 - 10B$ ;  $9 \div 15B$  та ін.).

Перемикач *SI* призначений для вибору автоматичного «*AUTO*» або ручного «*INPUT*» режимів керування.

Розглянуті підсилювачі напруги застосовують для нормалізації електричних величин, обладнаних іншими датчиками, наприклад, резистивними дільниками струму й напруги, джерелами ЕРС (термопари), різними опто-, п'єзо- і аудіоперетворювачами, вимірювальними трансформаторами з резистивними дільниками та ін. Усі розрахунки для таких приймальних елементів виконуються аналогічно.

#### 4.4. Розробка пристрою порівняння двох величин

Оскільки в структурній схемі (рис.4.1.1) передбачена операція порівняння двох величин  $U_1 = f(Q_1)$  і  $U_2 = f(Q_2)$ , то для рішення цієї задачі зручно використовувати суматор.

Розглянутий у розд. 4.3 операційний підсилювач може використовуватися і для створення аналогового обчислювального пристрою-суматора диференціального типу (рис. 4.4.1). Передатна функція для ідеального суматора запишеться у вигляді:

$$U_{вих} = \frac{R4}{R2} \cdot U_{вх2} - \frac{R3}{R1} \cdot U_{вх1}. \quad (4.4.1)$$

Результатом обробки вхідних сигналів у такому пристрої буде формування вихідної величини  $U_{вих}$ , обумовлена різницею двох нормованих сигналів  $U_{вх1}$  і  $U_{вх2}$ , для яких був прийнятий однаковий інтервал їхньої зміни, наприклад, від 0 до  $120^\circ C$ . Формально це можна представити у вигляді:

$$U_{вих}(t) = f[Q1(t) - Q2(t)]. \quad (4.4.2)$$

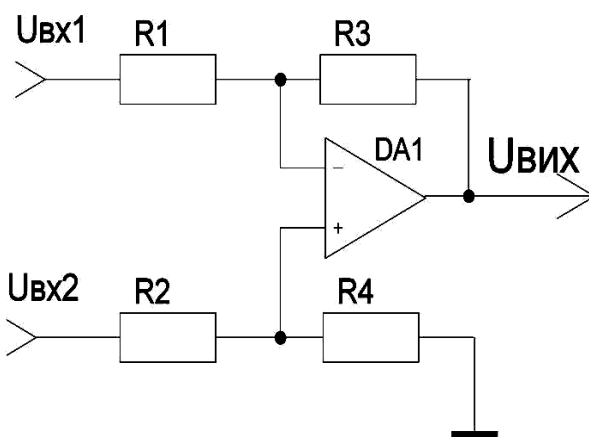


Рис. 4.4.1 – Суматор диференціального типу

#### 4.5. Розробка пристрою сигналізації

Технічне рішення на рис. 4.3.3 формує аналоговий сигнал, взаємозалежний з кількісною оцінкою контролюваного параметра. При експлуатації ТО завжди є доцільність оповіщення операторів про зміни контролюваної величини, що досягає визначених значень, тому даний пристрій варто оснастити сигналізатором, наприклад, верхнього і нижнього рівнів («небезпечно» і «норма», відповідно).

Як формувачі дискретних сигналів, що відповідають прийнятим нами рівням контролюваного параметра, зручно використовувати оптичні пари або логічні елементи. Оскільки рівень нормалізованого сигналу з прийомного елемента не перевищує 5 В, то використання дільника вихідного сигналу  $U_{вих}$  з емітерним повторювачем (рис. 4.5.1) дозволить розроблений пристрій (рис. 4.3.3) доповнити новими можливостями – сигналізацією заданих рівнів температури технологічного об'єкта.

Задавши величину струму дільника  $I_{\partial}$ , зробимо його розрахунок.

Для розрахунку скористаємося відомою математичною моделлю дільника

$$U_{\partial} = U_{вих} \cdot \frac{R2 + R3}{R1 + R2 + R3}, \quad (4.5.1)$$

$$U_{\partial} = I_{\partial} \cdot R_{\partial}. \quad (4.5.2)$$

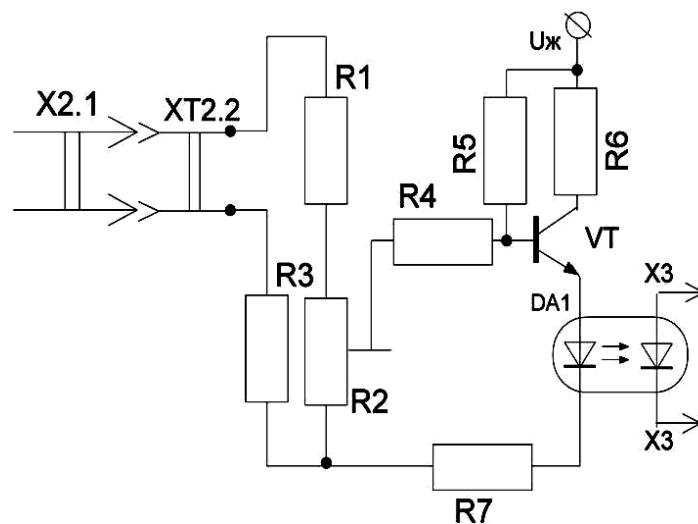


Рис. 4.5.1 – Схема дільника напруги з транзисторним повторювачем:  
 $R_i$  – резистори; VT – транзистор; DA1 – оптопара; X2, XT2, X3 – роз'єми;  
 $U_{ж}$  – напруга живлення схеми.

Допускаємо, що вплив ланцюга  $R_4$ , переходу «база-емітер» транзистора VT і оптопари DA1 незначно, яким можемо знехтувати. Приймаючи верхній рівень сигналу  $U_{вих} = 4,25$  В ( $102^{\circ}C$  - 85% шкали) і  $I_{\partial} = 3$  мА, визначаємо параметри компонентів дільника напруги:

$$R2 + R3 = \frac{2,3}{I_{\partial}} = \frac{2,3}{0,03} = 766,7 \text{ Ом};$$

$$R1 + R2 + R3 = \frac{5}{I_{\partial}};$$

$$R1 = \frac{4,25}{0,003} - (R2 + R3) = 1416,67 - 766,7 = 649,97 \text{ Ом}.$$

Аналогічно виконується розрахунок дільника напруги для сигналізації прийнятого нижнього рівня контрольованого параметра (наприклад,  $60^{\circ}\text{C}$ ).

Вибір резисторів для таких дільників роблять, користуючись відомою номенклатурою елементів, що випускаються промисловістю (табл. 4.3.2).

#### 4.6. Розрахунок параметрів для вибору транзистора підсилювача

Для вибору транзистора, що входить до складу схеми дільника напруги (рис.4.5.1), необхідно виконати розрахунок параметрів цього каскаду.

Вибір транзисторів для пристроїв автоматики роблять на основі розрахунку, приймаючи роботу підсилювача в ключовому режимі. Виконаємо подібний розрахунок для однотактного вихідного каскаду (рис.4.6.1), до якого не ставлять підвищені вимоги ККД. Задамося величиною ККД підсилювача потужності від 0,45 до 0,65.

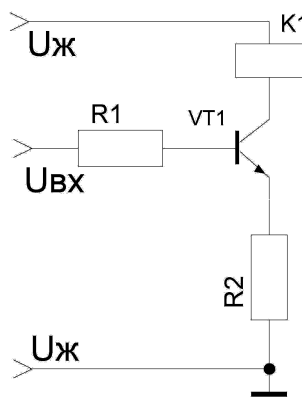


Рис. 4.6.1 – Підсилювач потужності

Оскільки підсилювач підключається до виходу дільника напруги, то оптимальним буде умова, коли

$$P_{max} \geq \frac{2 \cdot P_n}{\eta}, \quad (4.6.1)$$

$$U_{ke_{\max}} > 2 \cdot E, \quad (4.6.2)$$

де  $P_{\max}$  - максимальна припустима потужність транзистора, що розсіюється;

$P_H$  - корисна потужність на навантаженні;

$\eta$  - ККД;

$U_{ke_{\max}}$  - максимальне допустиме напруження колектор-еміттера;

$E$  - напруга джерела живлення.

Величина  $P_H$  визначається параметрами оптопари (табл.4.6.1).

Якщо умова (4.6.2) не виконується, то задаються величиною  $E$  - меншою за значенням.

Необхідний опір у ланцюзі колектора знаходимо за формулою

$$R_K = \frac{(E - \Delta E)^2 \cdot \eta}{2,5 \cdot P_H}, \quad (4.6.3)$$

де  $\Delta E$  - напруга, що відповідає початку прямолінійної ділянки статичної характеристики струму транзистора ( $\Delta E \cong 1 B$ );

$P_H$  - визначається технічними параметрами елемента підсилювача.

Таблиця 4.6.1 - Параметри резистивних оптронів

Тип елемента	Номінальні параметри керування		Параметри комутації (вихідний ланцюг)			Час вимикання, мс
	$U_e, B$	$I_e, mA$	$U, B$	$I, A$	$P, W$	
ОЕП-1	2,5	15	250	3,5	0,025	200
ОЕП-5	2,5	15	250	3,5	0,0375	160
ОЕП-9	5,8	16	20	0,2	0,025	100
ОЕП-12	5,8	16	250	2,0	0,025	200
ОЕП-14	5,8	16	10	1,0	0,015	200
ОЕП-6	3,8	16	35	0,2	0,01	120
ОЕП-16	2,5	10	5	0,1	0,005	0,5
АОТ110А	5,0	12	30	0,2	0,012	120
АОТ127А	5,0	14	30	0,07	0,05	100
5П19Т	5,0	12	~220	0,9	200	200

Виконаємо розрахунок, прийнявши вихідними наступні величини:

$$E = 9 B; \quad \Delta E = 1 B; \quad \eta = 0,5; \quad P_H = 0,0375 W (ОЕП-5).$$

$$R_K = \frac{(9 - 1)^2 \cdot 0,5}{2,5 \cdot 0,0375} = 341,3 \text{ Ом}.$$

Опір навантаження каскаду розраховується за формулою

$$R_H = (0,3 \div 0,25) \cdot R_K \cdot (1 - \eta). \quad (4.6.4)$$



Виконаємо розрахунок, використовуючи величину  $R_k = 341 \text{ Ом}$ .

$$R_H = 0,3 \cdot 341 \cdot (1 - 0,5) = 51,15 \text{ Ом}.$$

Для вибору робочої точки користуються тангенсом кута нахилу навантажувальної прямої для постійного струму відповідно залежності

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{I}{R_H + R_e}, \quad (4.6.5)$$

де  $R_e$  - опір у ланцюзі емітера для умови стабілізації режиму ( $\psi = 77^\circ \div 79^\circ$ ), відкіля можна визначити

$$R_e = |(1/\operatorname{tg} \psi) - R_H|. \quad (4.6.6)$$

Прийнявши величину  $\operatorname{tg} \psi \cong 5$ , виконаємо розрахунок:

$$R_e = |(1/5) - 51| = 50,8 \text{ Ом}.$$

Потужність, що віддається каскадом на навантаження, визначається за формулою

$$P_H = 0,125 \cdot (U_{K_{max}} - U_{K_{min}}) \cdot (I_{K_{max}} - I_{K_{min}}) \cdot \eta. \quad (4.6.7)$$

$$P_H = 0,125 \cdot (9 - 1) \cdot (0,02 - 0,005) \cdot 0,5 = 0,007 \text{ (Вт)}.$$

Таким чином, величина навантаження в ланцюзі колектора може бути розрахована за формулою

$$R_K = \frac{U_{K_{max}} - U_{K_{min}}}{I_{K_{max}} - I_{K_{min}}}, \quad (4.6.8)$$

$$R_K = \frac{9 - 1}{0,02 - 0,005} = 533 \text{ Ом}.$$

Вибираємо  $R_K = 520 \text{ Ом}$ .

Потужність підсилювача залежить від амплітуди струму і напруги в ланцюзі бази транзистора:

$$P_{bx} = 0,5 \cdot U_b \cdot I_b, \quad (4.6.9)$$

$$P_{bx} = 0,5 \cdot 5 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 25 \cdot 10^{-6} \text{ (Вт)},$$

а вхідний опір підсилювача – від співвідношення ( $R_1 = R_{ex}$ )

$$R_{ex} = \frac{U_{\delta}}{I_{\delta}}. \quad (4.6.10)$$

$$R_{ex} = \frac{5}{25 \cdot 10^{-6}} = 0,2 \cdot 10^6 \text{ Ом};$$

$$R_{ex} = 200 \text{ кОм}.$$

На підставі виконаних розрахунків, використовуючи довідкові технічні характеристики транзисторів, вибирають необхідний напівпровідниковий елемент схеми.

Відповідно до величин, розрахованих вище для оптопари *ОЕП-1*, підсилювач можна реалізувати на транзисторах малої потужності типу *КТ312*, *КТ361* та ін. (табл. 4.6.2). Значення резисторів обрані наступні:  $R_4 = 200 \text{ кОм}$ ;  $R_6 = 520 \text{ Ом}$ ;  $R_7 = 51 \text{ Ом}$ .

Аналогічно виконують розрахунки при виборі ВЕ – електродвигунів (табл. 4.10.1), ВЕ - реле (табл.4.10.2) та ін.

Розглянутий алгоритм розрахунку реалізований програмними засобами в пакеті *Windows*-додатка *SinSys*, що значно прискорює процедуру розрахунку.

Увівши необхідні вихідні дані у вікна відповідних елементів інтерфейсу додатка на електронній сторінці «*ПрЭ-ЗУМ*», варто натиснути кнопку «**СЧЕТ**». Результати розрахунку параметрів для вибору транзистора, а також для блоку живлення, необхідного для реалізації пристрою, будуть наведені у відповідних полях інтерфейсу програми.

Отримані в такий спосіб дані представлені в табл. 4.6.3.

Таблиця 4.6.2 – Параметри деяких транзисторів

Тип	Структура	Uкб, В	Uке, В	Ikмах, мА	Pкмах, Вт	Fгр., МГц
КТ312А	п-р-п	15	15	20	0,225	80
КТ361А	р-п-р	25	25	10	0,150	250
КТ315А	п-р-п	-	20	100	0,150	250
ГТ806Б	р-п-р	100	65	25	2	10
1Т813В	р-п-р	70	150	30	1,5	30
КТ209М	п-р-п	60	90	300	0,2	0,4
КТ3117Б	п-р-п	75	75	400	0,3	200
КТ3157А	р-п-р	250	250	100	0,1	60
КТ6117Б	п-р-п	160	140	600	250	100
КТ6127А	р-п-р	50	90	2000	30	150
2Т708А	р-п-р	100	100	2500	5	3
КТ8127А	п-р-п	1500	700	7500	56	2
КТ816М	р-п-р	60	60	6000	25	3
КТ8181А	п-р-п	700	400	8000	50	4
КТ1827А	п-р-п	100	100	40000	125	4
КТ926А	п-р-п	200	150	25000	450	51
КТ8116А	п-р-п	100	100	16000	125	4
ТІР122	п-р-п	100	100	Аналог - КТ8116А		

Подібні програмні рішення розробляються для автоматизації проектування різних типових каскадів, блоків і пристроїв. Головне призначення програмних продуктів – знизити ймовірність помилок і витрати часу на рутинні розрахунки, підвищити результативність розробників засобів автоматики.

Таблиця 4.6.3 – Результати розрахунку підсилювача і джерела живлення

№ п/п	Найменування величини, од.вим.	Позначення	Значення
1	Напруга живлення підсилювача, $B$	$U_{пит.}$	9
2	Опір навантаження, $\Omega$	$R_k$	628
4	Амплітуда напруги на навантаженні, $B$	$U_{max}$	3,5
5	Потужність на навантаженні, $Bm$	$P_{max}$	0,0098
6	Струм колектора транзистора, $A$	$I_{mk}$	0,0056
7	Потужність розсіювання на транзисторі, $Bm$	$P_{mk}$	0,0032
8	ККД підсилювача	$\eta$	0,61
9	Напруга джерела живлення, $B$	$E$	9
10	Середній споживаний струм, $A$	$I_{cp}$	0,0018
11	Потужність джерела живлення, $Bm$	$P_{дж}$	0,016

З огляду на нові можливості розробленого приймального елемента, на функціональній схемі він буде зображатися у вигляді (рис.4.6.2):

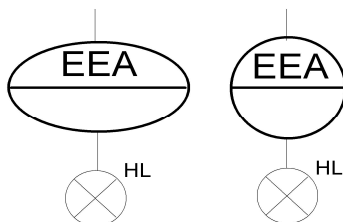


Рис. 4.6.2 – Зображення розробленого перетворювача на функціональних схемах

#### 4.7. Використання релейно-контактних систем блокування

У складних системах автоматики на технологічних об'єктах електротранспорту (ЕТ) системи блокування передбачаються дуже часто. Блокування – це приведення об'єкта керування в стан, що перешкоджає виконанню визначених дій. Їхнє застосування дозволяє надійно експлуатувати устаткування тільки при наявності передбачених завчасно логічних взаємозв'язків між різними величинами або параметрами. Якщо заданий логічний взаємозв'язок порушується – формуються сигнали тривоги, попередження або устаткування автоматично виключається.

На об'єктах ЕТ автоматичні пристрої вищевказаного призначення реалізуються за допомогою релейно-контактних схем. До складу таких схем входять приймальні елементи (ключі, кнопки керування, прилади, контактні і

безконтактні датчики та ін.), проміжні елементи (реле, підсилювачі, перетворювачі, регулятори, логічні пристрої і т.п.) і виконавчі елементи (електромагніти, контактори, електричні машини, інформаційні табло, аудіовипромінювачі і т.д.).

Система блокування на рис. 4.7.1 складається з приймальних елементів  $X_1$ - $X_6$ , виконавчих елементів  $Y$ ,  $HA_1$ ,  $EL_1$  і проміжного –  $K_1$ .

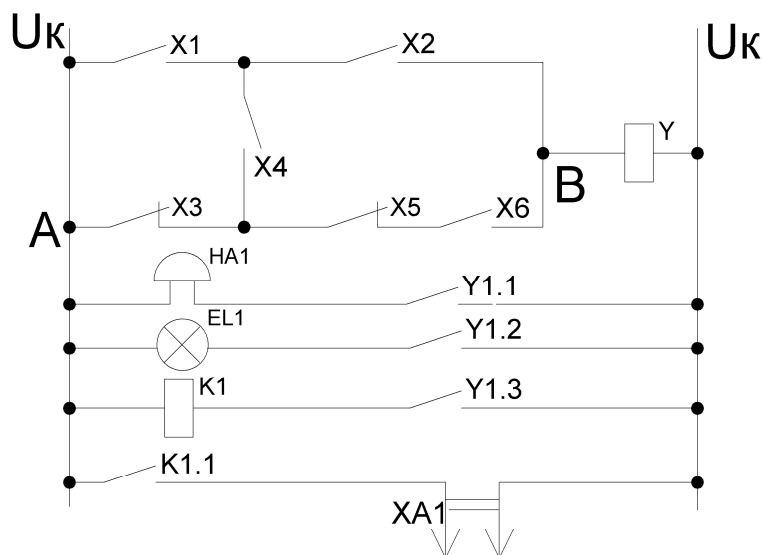


Рис. 4.7.1 – Фрагмент релейно-контактної схеми автоматики

У пристрої (рис. 4.7.1) всі аргументи ( $X_i$ ) характеризують визначені технологічні величини, що приймають тільки два значення («так/ні», 0 і 1). Ці логічні величини не виражають кількісних співвідношень між параметрами, а є символами, що відбивають умови або стани в схемі САР ТО: 0 – ланцюг розімкнутий, 1 – ланцюг замкнутий.

Схема працює в такий спосіб. При включенні електричного живлення, наприклад, щита керування силовим устаткуванням і контрольно-вимірювальними приладами (КВП) мийно-прибирального корпусу депо (МПК), спрацьовують відповідні проміжні реле, а їхні контакти  $X_2$ ,  $X_5$  відповідно замикаються. Якщо прилад контролю потенціалу на рухомій одиниці (розміщується на щиті КВП) справний і не виявляє неприпустиму величину контролюваного параметра, то  $X_6$  розімкнут.

При справному трансформаторі контрольована напруга на вході випрямного агрегату МПК відповідає нормованому значенню, а проміжне реле системи контролю напруги мережі при цьому замикає контакти  $X_3$ .

Припустимі умови експлуатації випрямного агрегату здійснюються за допомогою пристроїв контролю струму і напруги контактної мережі. Контактні групи проміжних реле приладів контролю струму ( $X_1$ ) і напруги ( $X_4$ ) включені в схему таким чином, що при спрацьовуванні кожного з приладів відповідні контакти  $X_1$  і  $X_4$  будуть замикатися. При спрацьовуванні, наприклад,

максимального реле струму по ланцюгу  $X_1, X_2$  напруга живлення  $U_K$  буде подана на елемент  $Y$ . Якщо спрацює максимальне реле напруги, буде замкнутий ланцюг  $X_3, X_4, X_2, Y$ . В обох випадках виконавчий елемент схеми  $Y$  включається. Контакти  $Y_{1.1}, Y_{1.2}, Y_{1.3}$  замкнуть лінії живлення відповідних компонентів схеми: звукового сигналу ( $HA_1$ ), світлового індикатора ( $HL_1$ ) і проміжного реле  $K_1$ . Контакти  $K_{1.1}$  у свою чергу замкнуть ланцюг подачі напруги  $U_K$  у систему керування, наприклад, випрямним агрегатом, у результаті чого буде сформований сигнал заборони експлуатації устаткування в позаштатному режимі.

Для раніше розглянутої умови контролю потенціалу на кузові рухомого транспорту слід зазначити, що при неприпустимих величинах аналізатор потенціалу спрацює, а контакт  $X_6$  прийме одиничний стан – замкнеться. У цьому випадку за ланцюгом  $X_3, X_5, X_6$  напруга живлення  $U_K$  буде подана на елемент схеми  $Y$  і повториться умова спрацьовування елементів  $HA_1, HL_1, K_1$ .

Розглянуті випадки спрацьовування елемента  $Y$  відбивають реакцію пристрою на порушення логічного взаємозв'язку між аргументами  $X_i$ , у зв'язку з чим, формується сигнал заборони експлуатації устаткування на ТО. Сигнал керування з виходу  $X_{A1}$  надійде до системи автоматики.

Оскільки релейно-контактна схема має потребу в регулярному обслуговуванні, то її доцільно замінити пристроєм на безконтактних логічних елементах, які не вимагають обслуговування, відрізняються надійністю, малими габаритами й економічністю.

Для вирішення поставленого завдання доцільно графічне зображення релейно-контактної схеми (рис. 4.7.1) навести в аналітичному вигляді – у вигляді формули. Структурна формула схеми може бути представлена наступною функцією:

$$F=f(X_1) \cdot X_1 + f(X_2) \cdot X_2 + f(X_3) \cdot X_3 + \dots + f(X_n) \cdot X_n \dots \quad (4.7.1)$$

Структурна формула безконтактних схем (4.7.1) записується для кожної функції  $F_i$  окремо, якщо маємо декілька величин  $Y_i$ . Використовуючи метод структурних матриць, складемо матрицю, враховуючи, що властивості всіх елементів розглянутої схеми не залежать від напрямку струму. При цьому матриця буде симетричною стосовно головної діагоналі і може бути представлена у вигляді:

$$\begin{vmatrix} 1 & \bar{X}_3 & X_1 & 0 & 0 \\ \bar{X}_3 & 1 & X_4 & \bar{X}_5 & 0 \\ X_1 & X_4 & 1 & 0 & \bar{X}_2 \\ 0 & \bar{X}_5 & 0 & 1 & X_6 \\ 0 & 0 & \bar{X}_2 & X_6 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.7.2)$$

Ця матриця має наступні властивості.

Якщо в ній викреслити  $i$ -й рядок і  $j$ -й стовпець, то визначник, що залишився, буде відповідати ланцюгу від вузла  $i$  до вузла  $j$ .

Так, наприклад, для визначення умов спрацьовування функції  $Y$  (рис. 4.7.1) необхідно визначити структурну формулу ланцюга між вузлами  $A$  та  $B$ . Викресливши в отриманій матриці (4.7.2) перший рядок і п'ятий стовпець, ланцюг між розглянутими вузлами виразиться наступним визначником:

$$\Delta_{A,B} = \begin{vmatrix} \bar{X}_3 & 1 & X_4 & \bar{X}_5 \\ X_1 & X_4 & 1 & 0 \\ 0 & \bar{X}_5 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \bar{X}_2 & X_6 \end{vmatrix} \quad (4.7.3)$$

$$\Delta_{A,B} = X_1 \cdot \begin{vmatrix} 1 & X_4 & \bar{X}_5 \\ \bar{X}_5 & 0 & 1 \\ 0 & \bar{X}_2 & X_6 \end{vmatrix} + X_3 \cdot \begin{vmatrix} X_4 & 1 & 0 \\ \bar{X}_5 & 0 & 1 \\ 0 & \bar{X}_2 & X_6 \end{vmatrix}; \quad (4.7.4)$$

$$Y(X) = X_1 \cdot \bar{X}_2 \vee X_1 \cdot X_4 \cdot \bar{X}_5 \cdot X_6 \vee X_1 \cdot \bar{X}_5 \cdot \bar{X}_2 \cdot \bar{X}_5 \vee X_3 \cdot X_4 \cdot \bar{X}_2 \vee X_3 \cdot \bar{X}_5 \cdot X_6; \quad (4.7.5)$$

Використовуючи асоціативний і дистрибутивний закони універсальної безлічі алгебри, логіки, одержимо:

$$\begin{aligned} Y(X) &= \bar{X}_5 \cdot X_6 \cdot (X_3 \vee X_1 \cdot X_4) \vee \bar{X}_2 \cdot (X_1 \vee X_1 \cdot \bar{X}_5 \vee X_3 \cdot X_4) = \\ &= \bar{X}_5 \cdot X_6 \cdot (X_3 \vee X_1 \cdot X_4) \vee \bar{X}_2 \cdot (X_3 \cdot X_4 \vee X_1). \end{aligned} \quad (4.7.6)$$

На основі матричного методу отримана формула може бути застосована для запису структури безконтактного пристрою, складеного на логічних елементах.

Безконтактну релейну схему ілюструє рис. 4.7.2.

Для реалізації даної схеми (рис. 4.7.2) використовують логічні мікросхеми однієї серії. Напруга живлення таких схем, звичайно, складає 5 В.

## 4.8. Розрахунок фотометричних приймальних елементів

Для формування вхідних сигналів, що відповідають аргументам  $X_1$ ,  $X_3$  -  $X_6$  (рис. 4.7.2), доцільно використовувати оптопари, що знайшли широке застосування в різній електронній апаратурі.

Для забезпечення нормальної роботи світловипромінювача в оптопарі (оптичній парі) необхідно зробити розрахунки баластового  $R_6$  або додаткового

резистора для забезпечення номінального струму при експлуатації оптичного елемента в схемі (рис. 4.8.1).

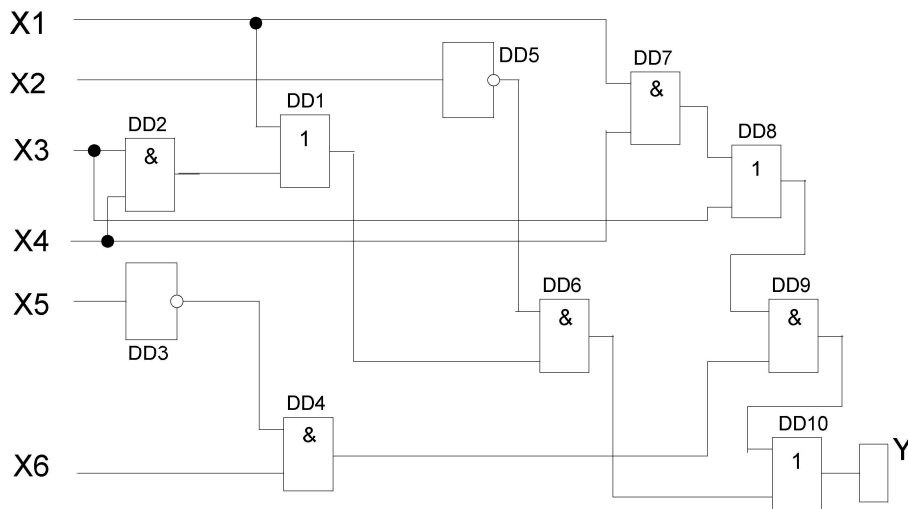


Рис. 4.7.2 – Безконтактна схема блокування

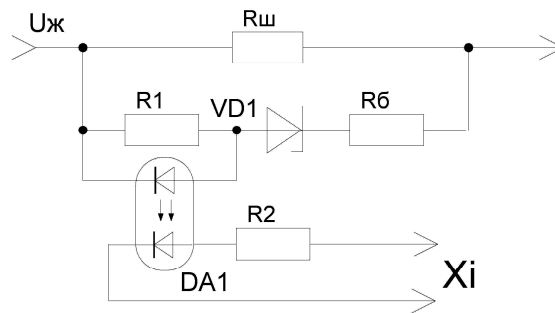


Рис. 4.8.1 - Схема дискретного приймального елемента з оптроном

При контролі струму короткого замикання (к.з.) величину  $R_{\bar{o}} = R_{ui}$  визначають, виконавши наступні розрахунки.

У вимірjuвальному ланцюзі схеми при к.з. спад напруги визначається залежністю:

$$U_u = U_{R_1} + U_{DA} + U_{R_{\bar{o}}} , \quad (4.8.1)$$

де  $U_{R_1}$  - спад напруги на резисторі  $R_1$ ;

$U_{DA}$  - спад напруги на стабілітроні;

$U_{R_{\bar{o}}}$  - спад напруги на баластовому резисторі.

Величину  $U_{R_1}$  визначають номінальним параметром керування  $U_{\bar{y}}$  оптопари (табл. 4.6.1).

Параметр  $U_{DA1}$  залежить від вибору стабілітрона  $U_{cm}$  (табл. 4.6.1).

Значення  $U_{\bar{o}}$  визначають з умови:

$$U_{\bar{o}} = I_{cm} \cdot R_{\bar{o}} , \quad (4.8.2)$$

відкіля

$$R_{\bar{\sigma}} = \frac{U_{\bar{\sigma}}}{I_{cm}}.$$

Якщо, наприклад,  $U_{cm} = 100 B$ ,  $I_{к.з.} = 300 A$ ,  $I_{cm} = 0,05 A$ ,  $U_{\bar{\sigma}} = 5,8 B$ , одержимо:

$$R_I = \frac{5,8}{0,05} = 116 (Ом),$$

$$U_u = 5,8 + 100 + 100 = 205,8 \cong 206 (B).$$

Прийнявши

$$U_u = \frac{I_{к.з.}}{R_{uu}}, \quad (4.8.3)$$

де  $I_{к.з.}$  - струм короткого замикання, визначимо величину

$$R_{uu} = \frac{I_{к.з.}}{U_u}, \quad (4.8.4)$$

$$R_{uu} = \frac{300}{206} = 1,46 (Ом).$$

Величина шунта вимірювальної схеми дорівнює  $1,5 Ом$ .

При використанні шунта - дровового резистора (табл.4.8.1) необхідно вибрати  $R_{uu}$ , користуючись даними їхніх характеристик.

Якщо величина  $R_{uu}$  не показана в списку номінальних значень, варто зробити повторний розрахунок, задавши іншою величиною  $U_{R_{\bar{\sigma}}}$ .

Для автоматизації розрахунку відповідно до розглянутого алгоритму, у пакеті програми *SinSys* є додаток «ПЭ-3Ф» для визначення величини  $R_{\bar{\sigma}}$ . Вихідні дані необхідно ввести у відповідні вікна і натиснути кнопки «Счет Rш» або «Счет Rб». Результати розрахунку величини шунта або баластового резистора, будуть показані на екрані інтерфейсу.

Таблиця 4.8.1 - Дані деяких дровових резисторів

Тип резистора	Межі величини опору $R_{\bar{\sigma}}, Ом$	Потужність номінальна, $Вт$	Припустимі відхилення, % від $R_{\bar{\sigma}}$
ЭНЭСС-1	270-350	550	20
ТРП-16	3	500	20
ТРП-17	1,5	50	30
ТРП-13	4,7	100	30
ТРП-15	5,6	100	30
ПЭ-15	5-5000	15	1



Тип резистора	Межі величини опору $R_{\bar{\sigma}}, \text{ Ом}$	Потужність номінальна, $\text{Вт}$	Припустимі відхилення, % від $R_{\bar{\sigma}}$
ПЭ-150	0,9-50	150	5; 10
ПЭ-50	1-15000	50	5; 10
ПЭВ-10Х	5-200	10	5; 10

#### 4.9. Розрахунок і розробка логічних приймальних елементів

Розроблена функціональна схема безконтактної схеми блокування (рис. 4.7.2) забезпечує формування логічних рівнів керуючого сигналу («0» - 0,5 В; «1» - 2,5...5,0В) відповідно до технічних характеристик логічних мікросхем використовуваних для реалізації. Такі пристрої надійно функціонують при формуванні входних сигналів (аргументів  $X_i$ ) відповідним аналогічним вимогам.

Для формування логічних рівнів входних сигналів створюються логічні датчики або комутатори. У таких пристроях формування величин  $X_i$  (1,0) здійснюється в строгій відповідності з завданням.

Прикладом такого дискретного датчика може бути пристрій, показаний на рис. 4.9.1.

Робота схеми заснована на використанні властивостей напівпровідникових стабілітронів, пробой яких відбувається тільки при визначених величинах напруги на їхніх анодах. У пропонованому пристрої через стабілітрони  $VD1$ ,  $VD2$  і  $VD3$  протікає струм, якщо в контрольованій силовій мережі  $U_{жс}$  напруга досягає умовно заданих рівнів, що відповідають максимальному -  $U_{жсmax}$ , нормальному -  $U_{жс0}$  і мінімальному -  $U_{жсmin}$ .

Для розрахунку величин резисторів кожного вимірювального ланцюга користуються наступною залежністю:

$$I_{cm} = \frac{U_{жс}}{R_{\bar{\sigma}} + R_{on} + R_{cm}}, \quad (4.9.1)$$

де  $I_{cm}$  - струм стабілізації;

$U_{жс}$  - напруга в контрольованій лінії живлення;

$R_{\bar{\sigma}}$  - баластовий опір вимірювального ланцюга;

$R_{on}$  - опорний резистор;

$R_{cm}$  - внутрішній опір стабілітрона.

Величини  $I_{cm}$  і  $R_{cm}$  залежать від електричних властивостей напівпровідникового елемента.

Величина резистора  $R_{on}$  визначається за формулою

$$U_{on} = I_{cm} \cdot R_{on}, \quad (4.9.2)$$

де  $U_{on}$  - опорна напруга, що відповідає логічній одиниці для елемента мікросхеми (DD).

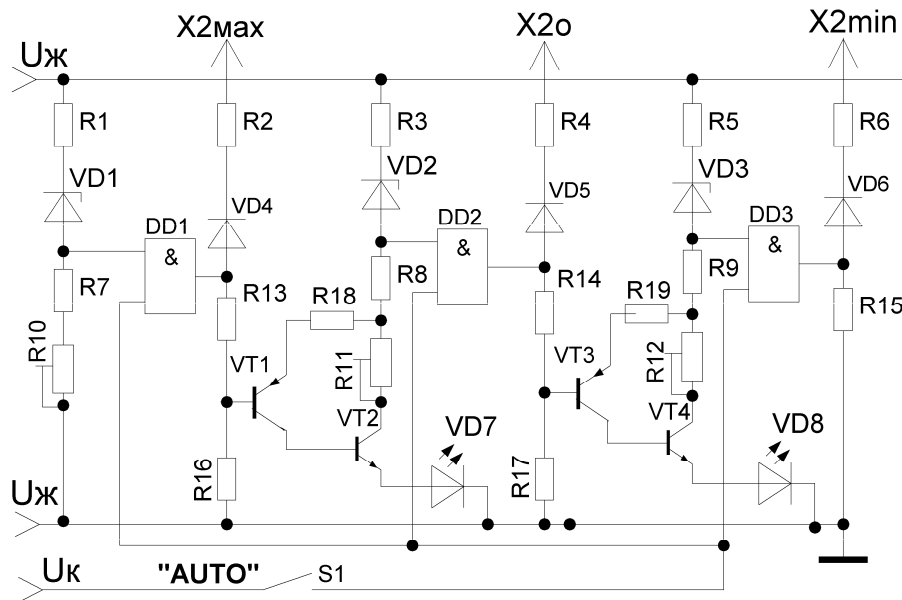


Рис. 4.9.1 - Схема прийомного елемента для контролю трьох рівнів напруги мережі постійного струму:

$R1-R19$  – резистори;  $VD1-VD3$  – стабілітрони;  $VD4-VD6$  – діоди;  $VD7, VD8$  – світлодіоди;  $VT1-VT4$  – транзистори;  $DD1-DD3$  – логічні елементи,  $S1$  – тумблер включення режиму “AUTO”.

Звідси

$$R_{on} = \frac{U_{on}}{I_{cm}}, \quad (4.9.3)$$

$$R_{on} = \frac{2,5}{0,015} = 16,6 \text{ Ом.}$$

Знаючи величини  $R_{cm}$  і  $R_{on}$ , легко визначити параметр  $R_{\phi}$ :

$$R_{\phi} = \frac{U_{жс} - U_{on} - U_{cm}}{I_{cm}}. \quad (4.9.4)$$

Якщо прийняти  $U_{жс} = U_{жс_{max}} = 700 \text{ В}$ ,  $U_{cm} = 100 \text{ В}$ ,  $U_{on} = 2,4 \text{ В}$ ,  $I_{cm} = 0,015 \text{ А}$ , то одержимо

$$R_6 = \frac{700 - 2,4 - 100}{0,015} = 39840 \text{ Ом.}$$

З довідників (табл. 4.3.2) вибирають резистори для виміру рівнів контрольованої величини. Для розглянутої частини схеми дискретного аналізатора напруги в мережі обрані були наступні елементи:  $R_1 = 39K$ ,  $R_7 + R_{12} = 166 \text{ Ом}$  і стабілітрон типу Д817ГП (табл. 4.9.1). Результати розрахунків наведені в табл.4.9.2.

Аналогічним образом розраховуються параметри всіх інших компонентів схеми.

Величина  $U_k$  (включення автоматичного режиму контролю) визначається рівнем логічної одиниці для конкретної серії логічних мікросхем. Для більшості мікросхем рівень  $U_k$  складає 2,5...5 В.

Беручи до уваги, що вихідні сигнали (аргументи) у приймальному елементі формуються в строгій відповідності за умови:

$$X2_{max}, \text{ при } U_{ж} \geq U_{жmax};$$

$$X2_o, \text{ при } U_{жmin} < U_{ж} < U_{жmax}; \quad (4.9.5)$$

$$X2_{min}, \text{ при } U_{ж} < U_{жmin},$$

очевидно, величину  $X2_{max}$  можна подавати на вхід  $X2$  безконтактного формувача керуючого сигналу (рис. 4.7.2). Сигнали  $X2_o$  і  $X2_{min}$  можуть використовуватися в системі сигналізації, для дистанційної передачі на автоматизовані робочі місця (АРМ) різного призначення, у локальних комп'ютерних мережах підприємства (Ethernet) та ін. Однак у цих випадках потрібно спеціальне програмне забезпечення і додаткове периферійне устаткування для комп'ютерів, якими оснащуються АРМ.

Таблиця 4.9.1 - Параметри деяких стабілітронів

№ п/п	Тип стабілітрона	$U_{см}, \text{ В}$	$I_{см}, \text{ А} \cdot 10^{-3}$	$P_{max}, \text{ Вт}$	Опір, Ом
1	Д815М	10	1000	8	0,07
2	Д815Е	15	500	8	0,10
3	Д816А	22	500	8	0,11
4	Д816В	33	150	5	0,12
5	Д816Д	47	150	5	0,12
6	Д817А	56	50	5	0,14
7	Д817Б	68	50	5	0,14
8	Д817В	82	50	5	0,14
9	Д817ГП	100	50	5	0,14

Таблиця 4.9.2 - Розрахунок параметрів схеми контролю напруги

№ п/п	Елемент схеми	Позначення на схемі	Величина	Примітка
1	Резистор	$R_1$	$39K$	
2	Резистор	$R_7$	$100 \text{ Ом}$	
3	Резистор	$R_{12}$	$100 \text{ Ом}$	Змінний
4	Стабілітрон	$VD_1$	$D817GP$	

На функціональній схемі автоматизації ОК такий пристрій буде зображуватися у наступному вигляді:

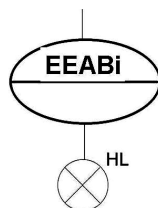


Рис. 4.9.2 - Умовна позначка функціональних характеристик розробленого пристрою

Розглянута схема або її фрагменти можуть також бути використані для контролю напруги і струму в силових мережах при їхній спільній роботі з вимірювальними трансформаторами напруги і струму. При цьому контролюються величини напруги і струму, формовані вимірювальними пристроями у вторинних обмотках – низька напруга в трансформаторах напруги (табл.4.9.3) і вторинний струм у трансформаторах струму (табл.4.9.4).

Параметри обмоток деяких трансформаторів струму наведені в табл.4.9.5.

#### 4.10. Розрахунок і розробка формувача керуючого сигналу

При використанні електродвигуна постійного струму як виконавчого елемента у системах автоматики варто зробити його узгодження. Узгодження зводиться до підбору номінальної потужності на виході підсилювача  $P_{\text{д ном}}$ , що повинна бути не менше потужності, що підводиться до двигуна в номінальному режимі  $P_{\text{д ном}} \geq U_{\text{ном}} I_{\text{ном}}$  і до узгодження номінальних напруг  $U_{\text{д}} = U_{\text{ном}}$ .

Якщо двигун в САР має номінальну потужність  $P_{\text{д ном}} = 5 \text{ Вт}$  з наступними паспортними величинами (табл.4.10.1):

$$U_{\text{ном}} = 100 \text{ В}; I_{\text{ном}} = 0,1 \text{ А}; R_{\text{я}} = 200 \text{ Ом}; N_{\text{ном}} = 6000 \text{ об/хв},$$

то необхідно обчислити деякі інші параметри, які необхідні при розробці виконавчого механізму.

Номінальна кутова швидкість:

$$\alpha_{ном} = \frac{\pi N_{ном}}{30} = \frac{3,14 \cdot 6000}{30} = 628 \text{ рад/с.} \quad (4.10.1)$$

Номінальний обертаючий момент:

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\alpha_{ном}} = \frac{5}{628} = 0,79 \cdot 10^{-2} \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (4.10.2)$$

Таблиця 4.9.3 – Параметри деяких однофазних вимірювальних трансформаторів напруги

Тип	Номінальна напруга, В		Номінальна потужність, В·А, у класі точності			Максимальна потужність, В·А
	Мережі	Низьке	0,5	1	3	
НІС-0,5	380	100	25	50	100	200
	500	100				
НОМ-6	1385	100	50	75	200	400
	3000	100	30	50	150	240
НОСК-6	6000	100	50	75	200	400

Таблиця 4.9.4 – Параметри трансформаторів струму

Номінальна лінійна напруга, кВ	0,66; 3; 6; 10; 15; 20; 35; 110; 150; 220; 330; 500	Примітка
Номінальний первинний струм, А	1,5,10,15,20,30,40,50,80,100,150,200,250, 300,400,500,600,800,1000,1500,6000,8000, 10000,12000,14000,16000,18000,20000, 25000,28000,32000,35500,40000	
Номінальний вторинний струм, А	1; 2; 2,5; 5	1,2 – до 3000 А
Номінальне навантаження з коефіцієнтом потужності 0,8 В·А	2,5; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 75; 100	
Номінальний клас точності	0,2; 0,5; 1; 3; 10	10 – для вбудованих трансформаторів

Таблиця 4.9.5 – Активні й індуктивні опори трансформаторів струму

Коефіцієнт трансформації струму	Опір, мОм, первинних обмоток класу точності			
	1		2	
	індуктивне	активне	індуктивне	активне
<i>I</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
20/5	67	42	17	10
30/5	30	20	8	8,2
40/5	17	11	4,2	4,8
50/5	11	7	2,8	3
75/5	4,8	3	1,2	1,3
100/5	2,7	1,7	0,7	0,75
150/5	1,2	0,75	0,3	0,33
200/5	0,67	0,42	0,17	0,19
300/5	0,3	0,2	0,08	0,088
400/5	0,17	0,11	0,04	0,05
500/5	0,07	0,05	0,02	0,02

Таблиця 4.10.1 – Основні дані деяких електричних машин

Тип	Напруга, Уном, В	Струм якоря, Іном, А	Швидкість обертання, Nном, об/хв.	Опір якоря, Ря, Ом	Потужність, Рном, Вт	Питома е.р.с., В/(об/с)
<u>Тахогенератори</u> ТД-101	110	0,1	1500	330	-	1,4
ТГ-3	27	0,1	4000	430	-	1
ТД-103ПМ	П.магніт	0,1	1000	700	-	6
ТД-201	110	0,2	1100	780	-	7,7
ТД201ПМ	П.магніт	0,2	1000	750	-	14,4
ТД-1М	110/50 Гц	0,15	2400	-	-	0,48
АТ-2	115/400 Гц	0,1	5000	-	-	0,06
<u>Реверсивні дв.</u> УАД-22	220	0,08	2750	470	3	-
УАД-42	220	0,13	2750	610	10	-
УАД-72	220	0,42	2750	320	50	-
<u>Реверс.крокові</u> АДП-362	110/50Гц	0,65	-	-	9,5	-
ШД-1А	25,100Гц	-	-	-	6,5	-
<u>Дв.пост.струму</u> СЛ-281	24	2,4	5200	1,15	26	-
<u>СЛ-321</u>	110	0,5	3600	51	24	-
СЛ-621	110	2,3	2400	230	172	-
З-116м	110	0,1	6000	230	5	-
СЛ-121	110	0,21	4800	130	5	-
<u>З пост. магн.</u> ДПМ-20	12	0,35	9000	380	-	-
<u>ДПМ-25</u>	27	0,6	6000	440	-	-
<u>ДПМ-35</u>	12	1,6	45000	540	-	-
<u>Синхронні</u> СДПМ-4	220 50 Гц /3ф.	0,013	1500	-	-	-
<u>Універсальні</u> УЛЮ2	220	0,14	8000	640	10	-
<u>УЛЮ62</u>	220	1,9	8000	430	130	-

Кутова швидкість ідеального холостого ходу:

$$\bar{\omega}_0 = \frac{\omega_{ном}}{1 - \rho} = \frac{\omega_{ном}}{1 - \frac{R_{я} \cdot I_{ном}}{U_{ном}}} = \frac{628}{1 - 0,18} = 770 \text{ рад/с.} \quad (4.10.3)$$

Коефіцієнти пропорційності:

$$C_e = \frac{U_{ном}}{\bar{\omega}_0} = \frac{110}{770} = 0,143 \text{ В.с/рад}; \quad (4.10.4)$$

$$C_m = \frac{M_{ном}}{I_{ном}} = \frac{0,79 \cdot 10^{-2}}{0,1} = 0,079 \text{ Н.м/А.} \quad (4.10.5)$$

Введемо умову, щоб швидкість ідеального холостого ходу при живленні від підсилювача потужності (ПП) дорівнювала швидкості холостого ходу при живленні від мережі, тобто  $\bar{\omega}_0 = 770 \text{ рад/с}$ . Тоді, з огляду на вираження для визначення швидкості ідеального холостого ходу при напрузі холостого ходу  $U_{xx}$  маємо

$$\bar{\omega}_0 = \frac{U_{xx}}{C_e}, \quad (4.10.6)$$

і величини відносного опору якірного ланцюга при живленні від мережі нескінченної потужності

$$\rho = \frac{R_{я} \cdot I_{ном}}{U_{ном}} \quad (4.10.7)$$

можемо визначити коефіцієнт пропорційності  $\alpha$  між номінальною і максимальною величинами потужності, що повинна віддаватися ПП при загальмованому двигуні

$$\alpha = \frac{I_{max}}{I_{ном}} = \frac{1}{2\rho} = \frac{U_{ном}}{2R_{я} \cdot I_{ном}} = \frac{110}{2 \cdot 200 \cdot 0,1} = 2,75. \quad (4.10.8)$$

Максимальну потужність, що повинний віддавати ПП, визначимо за формулою

$$P_{max} = \alpha^2 R_{я} I_{ном}^2 = 2,75^2 \cdot 200 \cdot 0,1^2 = 15 \text{ Вт.} \quad (4.10.9)$$

Пусковий момент визначається за формулою

$$M_n = \alpha M_{ном} = 2,75 \cdot 0,079 = 0,217 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (4.10.10)$$

Очевидно, що отримані дані варто враховувати в розрахунках для вибору активного елемента ПП і джерела живлення для нього, коректуючи результати за допомогою коефіцієнта  $\alpha$ .

Для сполучення двигуна з ПП, якщо передбачається, що він працює з номінальною швидкістю  $\omega = \omega_{ном}$  і заданим моментом навантаження  $M = 0,5M_{ном}$  варто розрахувати опір  $R_k$  двигуна, з огляду на опір двигуна  $R_{ном}$  у номінальному режимі експлуатації при  $\omega = \omega_{ном}$ ;  $M = M_{ном}$ :

$$R_{ном} = \frac{U_{ном}}{I_{ном}}; \quad (4.10.11)$$

$$R_k = R_{я} + R_{ном} \cdot \frac{M_{ном}\omega}{M\omega_{ном}} \cdot \left(1 - \frac{R_{я}}{R_{ном}}\right) = 200 + 2 \cdot \frac{110}{0,1} \cdot \left(1 - \frac{2000 \cdot 0,1}{110}\right) = 2000 \text{ Ом} \quad (4.10.12)$$

Потужність ПП для розрахованого навантаження:

$$P_y = k \cdot R_k \cdot I_{ном}^2, \quad (4.10.13)$$

де  $k$  – коефіцієнт, що враховує загальмований режим роботи двигуна ( $k \sim 0,13 - 0,2 \cdot \alpha$ ),

$$P_y = 0,2 \cdot 2,75 \cdot 2000 \cdot 0,1^2 = 11 \text{ Вт}.$$

Розрахунок параметрів для вибору активного елемента для підсилювача потужності розроблюваного приладу і джерела живлення виконується відповідно до алгоритму, розглянутому в розд. 4.6.

Якщо виконавчий елемент використовує електромагнітне реле, магнітний пускач (табл. 4.10.2) та ін. (табл. 4.10.3), аналогічний розрахунок варто виконати для конкретного елемента, використовуючи вихідні дані, які публікуються у відповідній довідковій літературі або документації до виробів.

З огляду на дане доповнення до розроблюваного пристрою, його позначення на функціональних схемах буде мати такий вигляд (рис. 4.10.2):

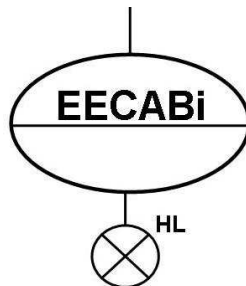


Рис. 4.10.2 – Умовна позначка розробленого пристрою з заданими функціональними характеристиками



Таблиця 4.10.2 – Параметри електромагнітних реле і вимикачів

Тип	Опір обмотки, Ом	Струм спрацьовування, мА	Струм відпускання, мА	Напруга живлення, В	Число груп контактів
РЕС-8	2500	15	2	12	2з
	300	30	6	24	1п
	2500	15	2	12	2р
	300	42	8	12	2р
РЕС-9	500	30	5	12	2р-2з
	9600	7	1,1	14	2р-2з
	72	80	13	16	2р-2з
РЕС-10	1600	10	-	11	1п
	4500	8	-	68	1п
	120	50	-	18	1п
РЕС-22	2800	11	2	16	4п
	175	36	8	24	4п
	700	21	3	24	4п
РЕС-55Б	1880	16,2	1,8	12,8	1р-1з
	35	2,5	0,3	3	1р-1з
	1880	14,2	1,6	27	2п
	67	2,5	0,3	5	1п
VB-3м	3	2,1	0,3	12,5	2п
Fujitsu	180	5	0,45	6	2п
	1260	12	0,9	24	2п
	5000	33	2,4	46	2п
ВАБ-43 ВАТ-43	0,28 – вмик. 0,48 – вимик.	73000	2000-5000	=110	-
PBO	4,1	195000	0	=110	-
PBK	0,8	55000	0	~220	-

Таблиця 4.10.3 – Параметри деяких тиристорів

Тип	Прямий струм у відкритому стані, А	Постійне зворотне живлення у включен. стані, В	Постійний струм, що відмикає, мА	Напруга відмикання, В	Напруга у відкритому стані, В	Час включення, мкс	Час вимикання, мкс
2У104А	0,1	15	15	2	2	0,29	2,5
КУ201А	25	200	100	6	2	10	100
КУ202Д	10	100	100	5	2	10	150
КУ202Н	10	400	100	5	2	10	150
КУ203Ж	10	150	450	5	2	3	7
2У211К	20	800	300	5	2	4	25
КУ208Г	5	400	500	5	2	10	10
Т6-10	10	100-1600	3-25	4	2,1	10	30-150
ЕВ320Б	320	100-2010	300	4	0,9	11	150-250
Е3-500	500	800-1600	400	7	1,6	10	250-500
Т253-800	800	10000	400	3,5	2,1	10	50

Очевидно, що розроблений прилад має всі функціональні властивості, що передбачені раніше у функціональній схемі автоматизації випрямним агрегатом (рис. 3.1).

#### 4.11. Розрахунок силового трансформатора блоку живлення

До розрахунку силового трансформатора входять: вибір типу осердя магнітопроводу і площі його перетину, визначення потужності вторинних обмоток, розрахунок числа витків первинної і вторинної обмоток, визначення діаметра обмотувальних проводів, розрахунок трансформатора на пробивну напругу.

При виборі типу осердя магнітопроводу виходять з умови, що застосування стрічкових конструкцій дозволяє скоротити розміри і вагу трансформатора приблизно на 10% у порівнянні із застосуванням осердь, зібраних із штампованих III-подібних пластин.

Потужність трансформатора визначають за потужністю споживачів енергії (вимірювальна схема, електронні підсилювачі, засоби сигналізації, виконавчі елементи і т.п.) і розраховують за формулою

$$P = \sum_{i=1}^n I_i \cdot U_i, \quad (4.11.1)$$

де  $I$  - сила струму, необхідна для живлення окремих елементів приладу автоматики,  $A$ ;

$U$  - напруга живлення,  $B$ ;  $i=1, 2, 3, \dots, n$ ...

Площу перетина осердя трансформатора розраховують за формулою

$$S_c = 70 \cdot \sqrt{\frac{\alpha \cdot P}{f \cdot B_T \cdot \Delta}} \text{ м}^2, \quad (4.11.2)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт, який дорівнює 2 – 3;

$P$  – потужність трансформатора,  $Bm$ ;

$f$  – частота струму в первинній обмотці,  $Гц$ ;

$B_T$  – припустима індукція,  $Gc$  (табл.4.11.1);

$\Delta$  – припустима щільність струму,  $A/\text{м}^2$  (табл. 4.11.2, 4.11.3).

Для визначення числа витків первинної і вторинної обмоток трансформатора користуються формулами

$$W_I = \frac{U_I \cdot \left(1 - \frac{\Delta U_I}{100}\right) \cdot 10^8}{4,44 \cdot f \cdot B_T \cdot S_c}; \quad (4.11.3)$$

Таблиця 4.11.1 - Значення індукції  $B_T$  за потужністю трансформатора

Потужність трансформатора $P, Вт$	1	3	10	30	50
Припустима індукція $B_T, Гс$	$4,6 \cdot 10^3$	$6,5 \cdot 10^3$	$8,0 \cdot 10^3$	$9,5 \cdot 10^3$	$14,0 \cdot 10^3$

$$W_2 = \frac{U_2 \cdot \left(1 + \frac{\Delta U_2}{100}\right) \cdot 10^8}{4,44 \cdot f \cdot B_T \cdot S_c}, \quad (4.11.4)$$

де  $U_1$  – напруга мережі первинної обмотки, В;

$U_2$  – напруга, що знімається з вторинної обмотки, В.

Величини спадання напруги в обмотках представлені в табл. 4.11.4.

Таблиця 4.11.2 – Параметри для розрахунку трансформаторів на III-подібних осердях

Потужність трансформатора $P, Вт$	ККД	Щільність струму, $А/м^2 \cdot 10^{-6}$
До 10	0,6 – 0,7	3,5 – 4,0
10 – 30	0,7 – 0,8	3,5 – 4,0
30 – 50	0,8 – 0,85	3,0 – 3,5
50 - 100	0,85 – 0,9	2,5 – 3,0
Понад 100	0,9	2,5 – 3,0

Таблиця 4.11.3 - Значення щільності струму в обмотках силових трансформаторів на стрічкових осердях (СО)

Сума потужностей вторинних обмоток $P, Вт$	15 - 50	50 - 150	150 - 300	300 - 500	500 - 100
Щільність струму $\Delta$ , $А/м^2 \cdot 10^{-6}$ при $f=50 Гц$	2,0 – 2,7	2,6 – 2,4	2,4 – 2,2	2,2 – 2,0	2,0 – 1,8

$$W_2 = \frac{U_2 \cdot \left(1 + \frac{\Delta U_2}{100}\right) \cdot 10^8}{4,44 \cdot f \cdot B_T \cdot S_c}, \quad (4.11.4)$$

де  $U_2$  – напруга вторинної обмотки (що знімається з вторинної обмотки), В.

Величини спаду напруги в обмотках наведені в табл.4.11.4.

Діаметр проводу обмотки обчислюють за формулою

$$d = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{I}{\Delta}} \text{ м}, \quad (4.11.5)$$

де  $I$  – сила струму у вторинній обмотці,  $A$ ;

$\Delta$  – щільність струму,  $A/m^2$ .

Величина дослідної напруги визначається за формулою

$$U_{исп} = 1000 + 2 \cdot U_p \text{ В.} \quad (4.11.6)$$

Таблиця 4.11.4 - Спад напруги  $\Delta U$  на обмотках трансформатора.

Сума потужностей вторинних обмоток $P$ , $Вт$	15 - 50	50 - 150	150 - 300	300 - 500	500 - 1000
$\Delta U$ , % при $f=50 \text{ Гц}$	6,0	6,0 – 5,5	5,5 – 4,0	4,0 – 3,0	3,0 – 1,7

#### Зразковий розрахунок трансформатора

Розрахуємо силовий трансформатор для пристрою автоматики, що має три вторинні обмотки наступного призначення: 2-1 обмотка – для живлення сигнальних елементів  $U_2=6,3 \text{ В}$ , сила струму  $I_2=2,4 \text{ А}$ ; 2-2 обмотка – для живлення виконавчого пристрою напруги ( $U_3=300 \text{ В}$ ,  $I_3=10 \text{ ма}$ ); 2-3 обмотка із середньою точкою – для живлення малогабаритного реверсивного електричного двигуна ( $U_4=300 \text{ В}$ ,  $I_4=36 \text{ ма}$ ).

Напруга живильної мережі  $220 \text{ В}$ , частота  $f=50 \text{ Гц}$ .

Для розрахунку необхідно:

1. Вибрати стрічкове осердя трансформатора.

2. За формулою (4.11.1) визначити потужність  $P_2$ , що знімається з вторинних обмоток трансформатора:

$$P_2 = I_2 \cdot U_2 + I_3 \cdot U_3 + I_4 \cdot U_4 = 2,4 \cdot 6,3 + 0,001 \cdot 300 + 2 \cdot 0,036 \cdot 300 = 15,1 + 3 + 21,6 = 39,7 \text{ Вт}$$

3. За табл.4.11.1 знайти індукцію в осерді  $B_T=12000 \text{ Гс}$ .

4. За табл.4.11.2, 4.11.3 вибрати щільність струму  $\Delta$  в обмотках трансформатора:

- для первинної обмотки  $\Delta=2,16 \cdot 10^{-6} \text{ А/м}^2$ ;

- для вторинних обмоток: 2-1 -  $\Delta=2,4 \cdot 10^{-6} \text{ А/м}^2$ ; 2-2 -  $\Delta=2,4 \cdot 10^{-6} \text{ А/м}^2$ ; 2-3 -  $\Delta=2,64 \cdot 10^{-6} \text{ А/м}^2$ .

5. За формулою (4.11.2) визначити площу перетину осердя трансформатора

$$S_c = 70 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot 39,7 \cdot 10^6}{50 \cdot 12000 \cdot 2}} = 5,05 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Наприклад, за табл.4.11.5 вибираємо тип осердя  $ШЛ20 \times 32$ ;

$$S_c=5,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; l_c=0,171 \text{ м}; G_c=7,65 \text{ Н}; h_l=0,005 \text{ м}.$$

Таблиця 4.11.5 – Параметри деяких осердь

Тип осердя	Розмір осердя, м			Дані осердя	
	h1	y1	Sс·10 <sup>-5</sup> , м <sup>2</sup>	Lс, м	Gс, н
ШЛ20х32	0,05	0,032	56	0,171	7,65
ШЛ25х32	0,0625	0,032	71	0,213	12,2
ШЛ32х40	0,08	0,04	113	0,273	24,5
ШЛ40х64	0,01	0,064	227	0,273	61,8
ШЛ40х80	0,01	0,08	284	0,273	77,5

6. За табл. 4.11.4 знайти спад напруги на обмотках

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 = \Delta U_3 = \Delta U_5 = 6\%$$

7. Визначити число витків для кожної обмотки трансформатора за формулами 4.11.3, 4.11.4:

- для первинної обмотки

$$W_1 = \frac{220 \cdot \left(1 - \frac{6}{100}\right) \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 12000 \cdot 5,6} = 1390 ;$$

- для вторинних обмоток

$$W_2 = \frac{6,3 \cdot \left(1 + \frac{6}{100}\right) \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 12000 \cdot 5,6} = 45 ;$$

$$W_3 = \frac{300 \cdot \left(1 + \frac{6}{100}\right) \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 12000 \cdot 5,6} = 2130 ;$$

$$W_4 = \frac{300 \cdot \left(1 + \frac{6}{100}\right) \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 12000 \cdot 5,6} = 2130 .$$

У двох секціях цієї обмотки число витків складає  $2130 \cdot 2 = 4260$ .

8. Визначити індукцію осердя при роботі трансформатора на холостому ході за формулою

$$B_{T0} = B_T \cdot \left(1 + \frac{\Delta U_1}{100}\right) = 12000 \cdot \left(1 + \frac{6}{100}\right) = 12750 \text{ Гс} .$$

9. За графіком (рис.4.11.1) знайти питомі втрати в сталі:

$$P_{с.уд.}(\text{при } B_T = 12000 \text{ Гс}) = 2 \text{ Вт/кг};$$

$$P_{c.yd.}(\text{при } B_{T_0} = 12000 \text{ Гс}) = 2,3 \text{ Вт/кг.}$$

10. Обчислити втрати в сталі:

$$P_{c_1} = P_{c.yd.} \cdot G_c = 2 \cdot 0,78 = 1,56 \text{ Вт};$$

$$P_{c_2} = 2,3 \cdot 0,78 = 1,8 \text{ Вт}.$$

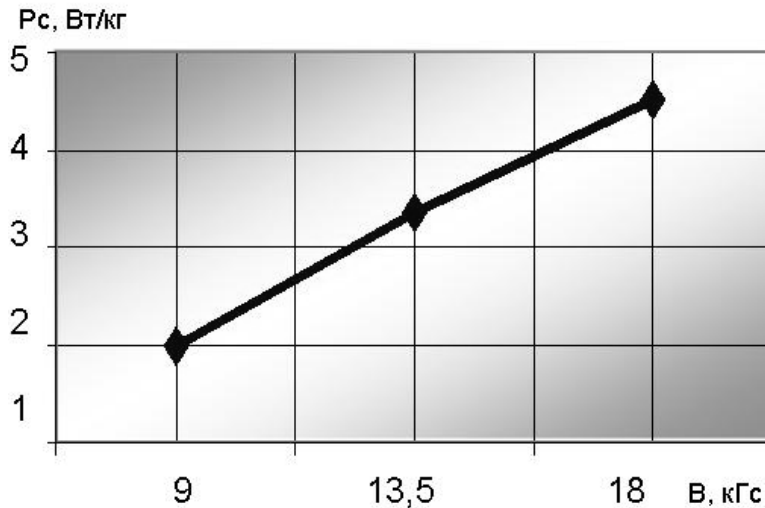


Рис. 4.11.1 – Залежність питомих витрат у сталі від індукції

11. Обчислити складову струму первинної обмотки, що залежить від струму вторинних обмоток:

$$I'_{1a} = I_2 \cdot \frac{U_2}{U_1} + I_3 \cdot \frac{U_3}{U_1} + I_4 \cdot \frac{U_4}{U_1} = 2,4 \cdot \frac{6,3}{220} + 0,01 \cdot \frac{300}{220} + 0,36 \cdot 2 \cdot \frac{300}{220} = 0,1809 \text{ А}.$$

12. Обчислити орієнтоване значення струму первинної обмотки з урахуванням коефіцієнта витрат  $K$  (табл.4.11.6):

$$I_1 = K \cdot I'_{1a} = 1,27 \cdot 0,1809 = 0,23 \text{ А}.$$

Таблиця 4.11.6 - Залежність коефіцієнта  $K$  від потужності

Сума потужностей вторинних обмоток $P$ , Вт	15 - 50	50 - 150	150 - 300
$K$ при $f=50 \text{ Гц}$	1,75	1,27	1,15

13. Визначити витрати в міді всіх обмоток:

$$P_M = P_{M_1} + P_{M_2} + P_{M_3} + P_{M_4} = \frac{6}{100} \cdot 220 \cdot 0,23 + \frac{6}{100} \cdot 6,3 \cdot 2 \cdot 4 + \\ + \frac{6}{100} \cdot 300 \cdot 0,01 + \frac{6}{100} \cdot 300 \cdot 2 \cdot 0,036 = 5,43 \text{ Вт.}$$

14. Знайти складову струму первинної обмотки, що залежить від витрат трансформатора:

$$I''_{1a} = \frac{P_c + P_{M_1} + P_{M_2} + P_{M_3} + P_{M_4}}{U} = \frac{1,56 + 5,43}{220} = 0,0318 \text{ А.}$$

15. Обчислити повну активну складову струму первинної обмотки:

$$I_{1a} = I'_{1a} + I''_{1a} = 0,181 + 0,0318 = 0,2128 \text{ А.}$$

16. Визначити напругу поля (рис.4.11.2), яка необхідна для створення в осерді знайденого значення індукції:

$$a_W = 2,7 \text{ А} \cdot \text{Вт/см при } B_T = 12000 \text{ Гс};$$

$$a_{W_0} = 3,2 \text{ А} \cdot \text{Вт/см при } B_{T_0} = 12750 \text{ Гс}.$$

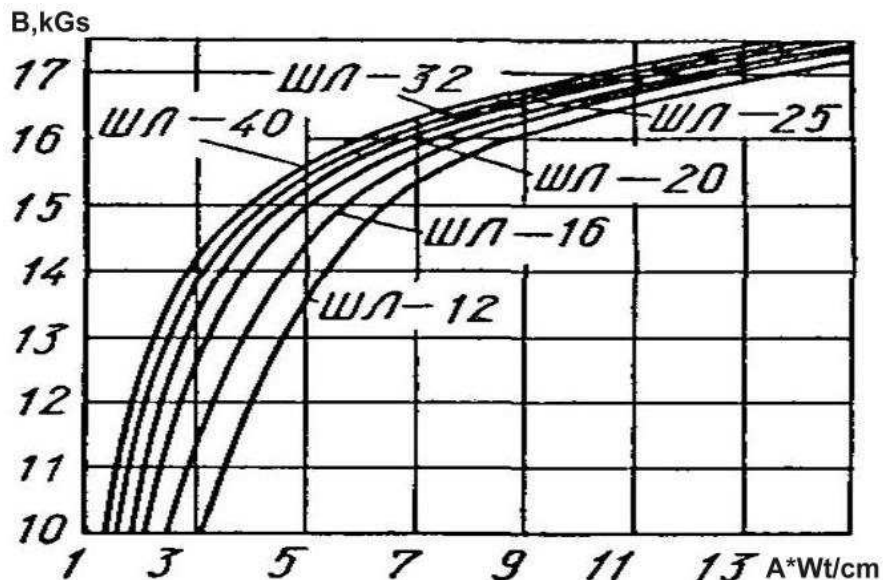


Рис. 4.11.2 – Залежність індукції в осерді від напруги магнітного потоку

17. Обчислити реактивну складову струму первинної обмотки при роботі під навантаженням і на холостому ході:

$$I_p = \frac{a_W \cdot l_c}{W_l} = \frac{2,7 \cdot 17,1}{1390} = 0,033 \text{ А};$$

$$I_{p0} = \frac{a_{W0} \cdot I_c}{W_I} = \frac{3,2 \cdot 17,1}{1390} = 0,0394 \text{ A}.$$

18. Знайти значення повного струму первинної обмотки:

$$I_I = \sqrt{I_{Ia}^2 + I_{Ip}^2} = \sqrt{0,2128^2 + 0,033^2} = 0,217 \text{ A}.$$

19. Оскільки отримане значення  $I_I = 0,217 \text{ A}$  відрізняється від отриманого в пункті 12 ( $I_I = 0,23 \text{ A}$ ), то задаючи значення  $I_I = 0,217 \text{ A}$ , повторюють обчислення:

$$P_M = \frac{6}{100} \cdot 220 \cdot 0,217 + 0,81 + 0,81 + 1,13 = 5,26 \text{ Bm};$$

$$I_{Ia}'' = \frac{1,56 + 5,26}{220} = 0,031 \text{ A};$$

$$I_{Ia} = I_{Ia}' + I_{Ia}'' = 0,181 + 0,031 = 0,212 \text{ A};$$

$$I_I = \sqrt{0,212^2 + 0,035^2} = 0,215 \text{ A}.$$

Це значення струму близьке до заданої величини.

20. Обчислити величину активної складової струму холостого ходу:

$$I_{a0} = \frac{P_c}{U_I} = \frac{1,56}{220} = 0,0071 \text{ A}.$$

21. Визначати величину струму холостого ходу:

$$I_0 = \sqrt{I_{a0}^2 + I_{p0}^2} = \sqrt{0,0071^2 + 0,0394^2} = 0,0398 \text{ A}.$$

22. Визначити діаметр проводу кожної з обмоток:

- первинна обмотка

$$d_I = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{0,215}{2,16}} = 364 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$



- вторинні обмотки

$$d_2 = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{2,4}{2,4}} = 113 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

$$d_3 = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{0,01}{2,4}} = 73 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

$$d_4 = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{0,036}{2,64}} = 132 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

23. Вибір марки проводу виконують за довідниками діаметрів обмотувальних проводів (наприклад, ПЭВ-1):

$$d_1 = 38 \cdot 10^{-5} \text{ м}; d_{13} = 39 \cdot 10^{-5} \text{ м}; d_2 = 116 \cdot 10^{-5} \text{ м}; d_{23} = 124 \cdot 10^{-5} \text{ м};$$

$$d_3 = 8 \cdot 10^{-5} \text{ м}; d_{33} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}; d_4 = 13 \cdot 10^{-5} \text{ м}; d_{43} = 155 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

24. Знайти величину дослідної напруги

$$U_{исп} = 1000 + 2 \cdot (U_I + U_{вт. max}) = 1000 + 2 \cdot (220 + 300) \text{ В}.$$

#### 4.12. Розробка імпульсного джерела електричного живлення

Сучасні засоби автоматики мають порівняно невеликі габарити, а їхнє енергоспоживання не перевищує декількох десятків ватів. Для надійного функціонування таких пристроїв розробляються малогабаритні імпульсні джерела електричного живлення (ІДЕЖ).

Перевагою ІДЕЖ є можливість одержання необхідного коефіцієнта потужності, що наближає форму споживаного струму до тієї, яка спостерігається при включенні в мережу чисто активного навантаження. ІДЕЖ відрізняються необхідною економічністю і відповідають міжнародним стандартам, що регламентують рівень гармонійних складових, які викликаються в однофазній живильній мережі, наприклад, з напругою 220...240В, від якої живляться багато споживачів електроенергії. Група споживачів D (стандарт IEC-1000-3-2) містить у собі будь-яке електричне устаткування потужністю до 600 Вт, до якого можна віднести і розроблюване технічне рішення, що споживає струм менше 16 А.

Крім того, популярність ІДЕЖ обумовлена економічністю, можливістю створення пристроїв компенсації реактивної потужності, реалізації режиму безперебійного електричного живлення пристроїв автоматики без суттєвих доробок самого ІДЕЖ.

В ІДЕЖ важливим є правильний розрахунок трансформатора.  
Для ІДЕЖ розраховують наступні величини:

- *споживану потужність  $P_n$*

$$P_n = U_{np} \cdot I_{np} + U_{nv} \cdot I_{nv} + U_{nt} \cdot I_{nt}, \quad (4.12.1)$$

де  $U_{np}$  – напруга навантаження, В;

$I_{np}$  – струм, споживаний навантаженням, А;

$U_{nv}, U_{nt}$  – напруга на відповідних навантаженнях, В;

$I_{nv}, I_{nt}$  – струми, споживані навантаженнями, А;

- *використовувану потужність трансформатора*

$$P_{is} = 1,3 \cdot P_n. \quad (4.12.2)$$

- *площу перетину трансформатора на торі*

$$S_C = 0,01 \cdot \frac{(D_D - D_d) \cdot H}{2}, \quad (4.12.3)$$

де  $D_D$  – зовнішній діаметр, см;

$D_d$  – внутрішній діаметр, см;

$H$  – висота осердя, см;

- *площу вікна обраного осердя*

$$S_O = 0,01 \cdot \frac{\pi \cdot D_D \cdot D_d}{4}. \quad (4.12.4)$$

- *габаритну потужність трансформатора на торі*

$$P_\partial = \frac{S_C \cdot S_O \cdot F \cdot B_m}{150}, \quad (4.12.5)$$

де  $F$  – частота коливань генератора, кГц;

$B_m$  – магнітна індукція в осерді, Т.

Якщо використовувана потужність менше її габаритної, то варто застосовувати інший типорозмір осердя. Інакше розрахунок необхідно продовжити:

- *напругу на первинній обмотці*

$$U_I = \frac{U_p}{2} - 1,6, \quad (4.12.6)$$

де  $U_p$  – напруга автономного джерела живлення;

- *число витків первинної обмотки трансформатора*

$$W_1 = \frac{2,5 \cdot U_1}{F \cdot B_m \cdot S_C} ; \quad (4.12.7)$$

- *максимальний струм первинної обмотки*

$$I_1 = \frac{P_n}{0,8 \cdot U_1} ; \quad (4.12.8)$$

- *діаметр проводу для цієї обмотки*

$$D_1 = 0,6 \cdot \sqrt{I_1} ; \quad (4.12.9)$$

- *число витків вторинних обмоток*

$$W_i = \frac{W_1 \cdot U_i}{U_1} ; \quad (4.12.10)$$

- *діаметр проводів для кожної вторинної обмотки*

$$D_i = 0,6 \cdot \sqrt{I_i} . \quad (4.12.11)$$

Для автоматизації процесу розрахунку ІДЕЖ розроблена програма «БП-ИТ», що входить до пакету *Windows* - додатка *SinSys* (рис. 4.12.1). При введенні всіх вихідних даних до відповідного вікна інтерфейсу *Windows*-дodatка «БП-ИТ» результати розрахунку будуть показані після натискання кнопки «СЧЕТ». Якщо коефіцієнт використання трансформатора не виходить за припустимі межі, то результати обчислень можна прийняти за базові для розробки ІДЕЖ.

Приклад такого розрахунку для осердь різних типорозмірів ілюструє табл. 4.12.1, в якій наведені дані для наступних вихідних величин:

- частота генератора дорівнює  $30 \text{ kHz}$  ;
- напруга вторинних обмоток: обмотка 2-1 –  $U_{н1} = 6,3 \text{ В}$ ; 2-2 –  $U_{н2} = 9 \text{ В}$ ; 2-3 –  $U_{н3} = 5 \text{ В}$ ; 2-5 –  $U_{н5} = 16$  ;
- струм вторинних обмоток: обмотка 2-1  $I_{н1} = 0,1 \text{ А}$ ; 2-2 -  $I_{н2} = 0,05 \text{ А}$ ; 2-3 -  $I_{н3} = 0,05 \text{ А}$ ; 2-5 -  $I_{н5} = 0,5 \text{ А}$ ;
- напруга живлення перетворювача  $U_{num} = 12 \text{ В}$ ,
- величина індукції осердя  $B = 0,1 \text{ Т}$ .

З результатів розрахунку видно, що не всі осердя придатні для проектного пристрою. Аналіз отриманих конструктивних величин дозволяє укласти, що деякі з них складно реалізувати на практиці, або габаритна

потужність виробу необґрунтовано перевищує необхідну. Найбільш придатними для розроблюваного приладу можна визнати трансформатори з величинами габаритної потужності *16* і *21 Вт*.

У тих випадках, коли визначення параметрів трансформатора зв'язано з рутинними розрахунками, у програмі «БП-ИТ» передбачений автоматизований режим їхнього визначення.

Для запуску автоматичного режиму розрахунку необхідно вихідні дані обов'язково ввести у вікна обмотки «**Un6**», натиснути кнопку **<A> (AUTO)** і вибрати для пошуку величину дискретного кроку за величинами напруги **<Un(+)>**, або струму **<In(+)>**. Зміна результатів розрахунку у відповідних вікнах інтерфейсу дозволить зупинити розрахунок при досягненні шуканого результату. Зупинку автоматичного режиму виконують натисканням кнопки **<STOP-RESET>**.

Таблиця 4.12.1 – Розрахунок трансформатора імпульсного джерела електричного живлення

Зовнішній діаметр $D_D$ , мм	Внутрішній діаметр $D_d$ , мм	Висота осердя $h$ , мм	Напруга первинної обмотки $U_{m2}$ , V	Струм первинної обмотки $I_{m2}$ , A	Кількість витків первинної обмотки	Діаметр проводу первинної обмотки, $d_{m2}$ мм	Число витків 1-ї вторинної обмотки	Число витків 2-ї вторинної обмотки	Число витків 3-ї вторинної обмотки	Число витків 5-ї вторинної обмотки	Діаметр проводу 1-ї вторинної обмотки	Діаметр проводу 2-ї вторинної обмотки	Діаметр проводу 3-ї вторинної обмотки	Діаметр проводу 5-ї вторинної обмотки	Габаритна потужність $P_2$ , Вт	Потужність, споживана навантаженням $P_n$ , Вт	Використовувана потужність трансформатора, $P_u$ , Вт	Площа осердя $S_m$ , см <sup>2</sup>	Площа вікна осердя $S_o$ , см <sup>2</sup>
40	20	30	4,51	2,59	1	0,96	1	2	1	3	0,19	0,13	0,13	0,42	75	9,33	12,13	3,0	3,14
30	15	20	4,51	2,59	2	0,96	3	4	2	7	0,19	0,13	0,13	0,42	21	9,33	12,13	1,5	1,77
30	15	15	4,51	2,59	2,5	0,96	4	5	3	9	0,19	0,13	0,13	0,42	16	9,33	12,13	1,13	1,77
60	20	10	4,51	2,59	1,5	0,96	2	3	2	5	0,19	0,13	0,13	0,42	50	9,33	12,13	2	3,14
50	30	10	4,51	2,59	2,8	0,96	4	6	3	10	0,19	0,13	0,13	0,42	56	9,33	12,13	1	7,07
70	50	8	4,51	2,59	3,52	0,96	5	7	4	13	0,19	0,13	0,13	0,42	125	9,33	12,13	0,8	19,6
100	85	10	4,51	2,59	3,76	0,96	5	8	4	13	0,19	0,13	0,13	0,42	340	9,33	12,13	0,75	56,7
100	40	10	4,51	2,59	0,9	0,96	1	2	1	3	0,19	0,13	0,13	0,42	300	9,33	12,13	3	12,5
120	10	10	4,51	2,59	2,82	0,96	4	6	3	10	0,19	0,13	0,13	0,42	630	9,33	12,13	1	78,5

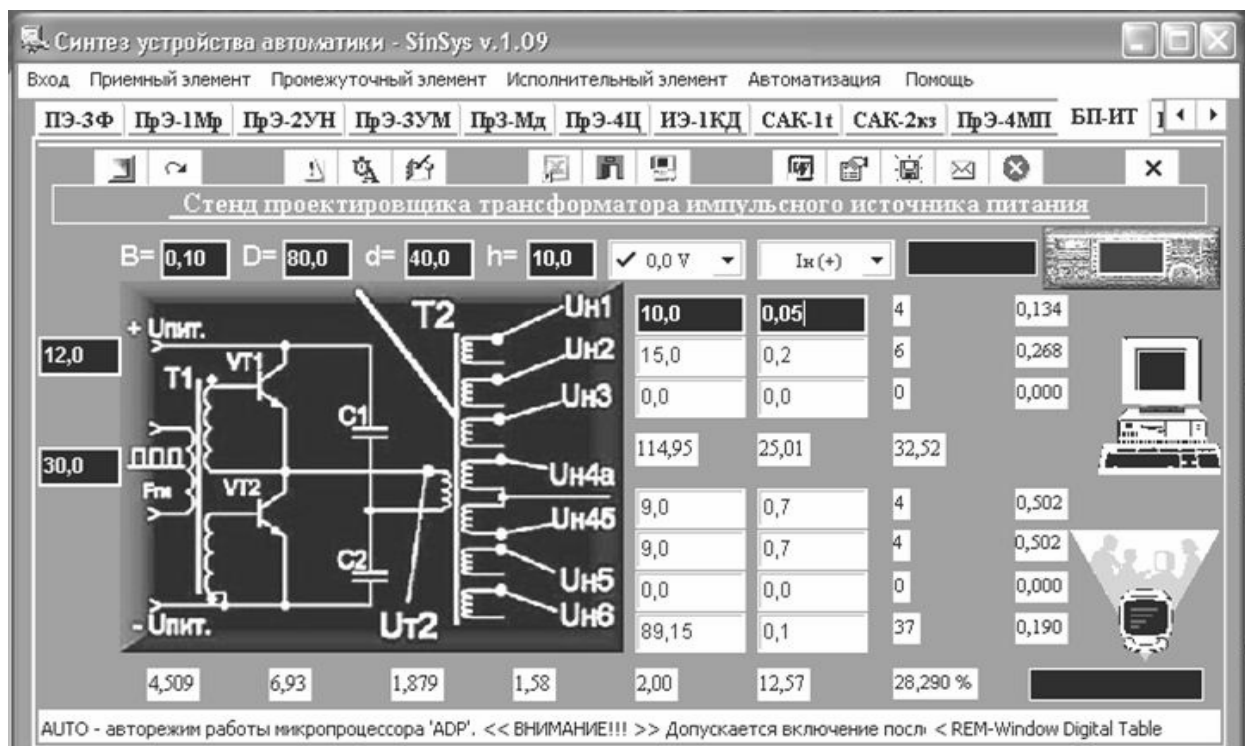


Рис.4.12.1 – Интерфейс программы «БП-ИТ»

#### 4.13. Розробка блок-схеми алгоритму керування ТО

Сучасні засоби автоматизації ТО часто реалізують за допомогою мікропроцесорних пристроїв. Основу їхнього проектування складають блок-схеми алгоритмів (розпоряджень), що потрібно реалізувати для ефективного керування технологічними процесами.

Докладно розробка блок-схем алгоритмів для ОК розглянута в [1,2].

#### 4.14. Реалізація алгоритмів керування програмувальними технічними засобами

За допомогою програмувальних технічних засобів реалізуються самі складні алгоритми керування технологічними об'єктами. Реалізацію алгоритмів керування виконують за допомогою цифрових і мікропроцесорних пристроїв.

Цифрові засоби автоматики «із твердою логікою» створюють на базі логічних елементів, і вони реалізують алгоритми керування, що не мають потреби в змінах.

Якщо алгоритми керування ТО мають потребу в змінах, а системи автоматизації повинні мати властивість адаптації до можливих варіацій змінних, то їх реалізують за допомогою програмувальних засобів автоматизації на базі мікропроцесорів (мікроконтролерів). Будь-який мікропроцесор або мікроконтролер, що складають основу сучасних інтелектуальних засобів

автоматики, функціонують на основі розроблених ексклюзивних програмних продуктів.

Особливості ОК завжди вимагають або доробки існуючих програм, придатних для використання в конкретній системі автоматизації, або написання абсолютно нових програм, враховуючі всі нюанси конкретного технологічного об'єкта.

Система автоматизації, розробка компонентів якої розглядалася в розд. 4, у мікропроцесорному варіанті базується на програмному забезпеченні, що реалізує принципи позиційного керування локальними об'єктами [3]. Прикладом такої системи автоматизації служить програма «**SauMuk**», що входить до *Windows*-додатка *SinSys*. Для її запуску необхідно натиснути кнопку <Автоматизація> у меню «*Прикладні програми*», вибрати рядок «**АРМ МУК**» і натиснути її або одночасно натиснути на клавіатурі кнопки <Ctrl> + <U>.

Інтерфейс програми «**SauMuk**» ілюструє рис. 4.14.1.

Дана програма розроблена на кафедрі електричного транспорту ХНАМГ. Вона повною мірою ілюструє керування процесом обслуговування рухомого складу в мийно-прибиральному корпусі депо. Програма дозволяє керувати всім устаткуванням та пристроями у МПК в автоматичному, напівавтоматичному або ручному режимах, покладаючись на розсуд оператора.

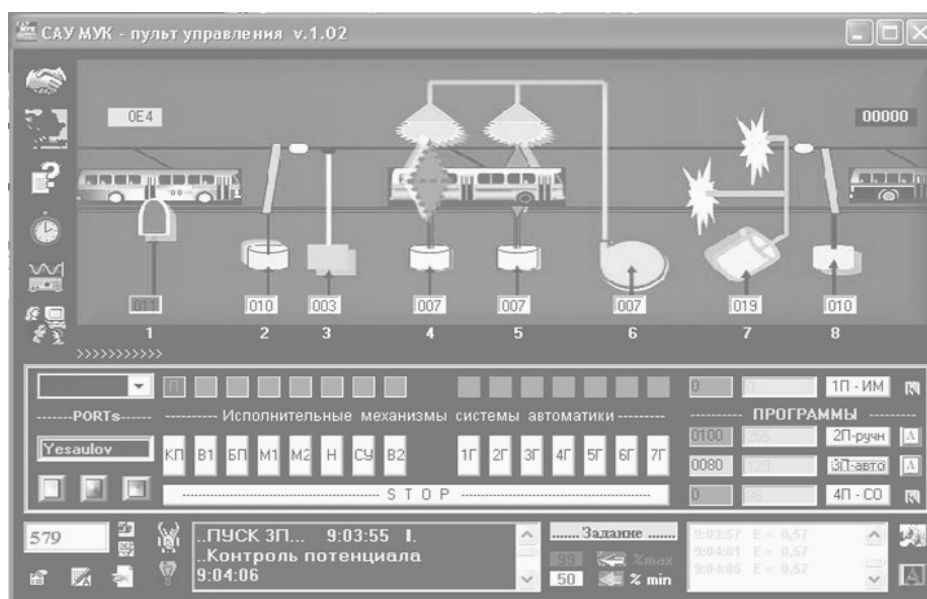


Рис.4.14.1 – Інтерфейс програми «**SauMuk**»

Алгоритм роботи цієї системи передбачає використання декількох локальних систем автоматичного регулювання, розташовуваних на різних ТО корпусу, в числі яких і система автоматизації джерела живлення контактної мережі, приклад розрахунку, і розробка якої були виконані в розд. 1-4.

Більш складні системи керування ТО, до яких відносяться обчислювальні, пошукові і комбіновані - завжди припускають програмування математичних моделей ОК і *пропорційно – інтегрально - диференціальних (ПІД)* регуляторів.

Мікропроцесорні *обчислювальні системи* в реальному часі розраховують параметри математичних моделей і здійснюють самонастроювання їх.

*Пошукові системи* виконують визначення оптимальних параметрів настроювання в процесі функціонування ТО.

*Комбіновані системи* сполучають у собі різні шляхи адаптації, що забезпечують досягнення оптимального регулювання за мінімальний проміжок часу.

Очевидно, що програмування таких складних пристроїв автоматики вимагає великих витрат часу, тому що рішення поставлених задач нерідко змушує багаторазово переглядати математичні моделі процесів, принципи й алгоритми одержання необхідних результатів і багато чого іншого.

Однак програмувальні системи автоматизації мають суттєві переваги, що пов'язані з можливістю їхньої швидкої модернізації шляхом удосконалювання програмного забезпечення.

#### 4.15. Економічні показники проектованої системи автоматизації ТО

На підставі проведених розрахунків була розроблена локальна система автоматики випрямного агрегату МПК. Оскільки пропонуване технічне рішення призначене для удосконалювання наявного устаткування, то оцінка його економічних показників може бути виконана на підставі порівняння роботи функціонуючого устаткування з модернізованим варіантом.

Витрати на виготовлення нового технічного рішення можна визначити, тому що всі компоненти входять у розроблені схеми. Крім того, варто враховувати витрати на проектування, розробку програмного продукту, якщо передбачається модернізація автоматизованого робочого місця оператора корпусу.

Після виготовлення схеми звичайно виконуються роботи з її налагодження, монтажеві на діючому устаткуванні й остаточні пуско-налагоджувальні роботи всієї системи автоматики з модернізованими вузлами або блоками.

Витрати на розробку пропонуваного технічного рішення наведені в табл. 4.15.1.

Таблиця 4.15.1 – Витрати на розробку системи автоматики

№	Елементи витрат	Сума, грн.
1	Дослідницькі роботи	1200
2	Проектні роботи	1300
3	Компоненти пристрою	600
4	Матеріали для виготовлення пристрою на друкованій платі	70
5	Розробка (модернізація) програмного забезпечення	800
6	Монтаж і пуско-налагоджувальні роботи	2500
<b>ВСЬОГО</b>		<b>6470</b>



Витрати на експлуатацію існуючої і пропонованої систем автоматики можуть бути визначені при використанні даних з технологічного об'єкта.

Наприклад, для експлуатації устаткування мийно-прибирального корпусу депо, де використовується розглянута система автоматики, витрати на оплату електричної енергії можна розрахувати за формулою

$$Z_1 = Q \cdot T, \quad (4.15.1)$$

де  $Q$  – кількість використаної електроенергії,  $\text{кВт}$ ;

$T$  – тариф за один  $\text{кВт/год}$ ,  $\text{грн.}$ ,

$$Z_1 = 3600 \cdot 0,252 = 907 \text{ грн.}$$

Оскільки в новому технічному рішенні пропонується виключити релейні компоненти, то, можливо, що споживання електричної енергії напівпровідниковими схемами скоротиться, і буде складати

$$Z_{1н} = 460 \cdot 0,252 \cong 116 \text{ грн.}$$

Витрати на обслуговування релейно-контактної системи автоматики визначаються регламентом на проведення таких робіт і можуть бути розраховані за формулою

$$Z_2 = N \cdot T, \quad (4.15.2)$$

де  $T$  – середня місячна заробітна плата персоналу, що обслуговує конкретне устаткування;

$N$  – кількість місяців.

$$Z_2 = 150 \cdot 12 = 1800 \text{ грн.}$$

Перевага безконтактних логічних мікросхем, що складає в їхній експлуатації без обслуговування, можливо, скоротить витрати, передбачені раніше за цією статтею. В грошовому вираженні ця величина визначиться:

$$Z_{2н} = 28 \cdot 12 = 336 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію системи автоматики визначаються поквартально, виходячи з базової вартості устаткування на початок кварталу за встановленою нормою амортизації:

$$A = \frac{S \cdot N}{100}. \quad (4.15.3)$$

Оскільки пропонується пристрій можна віднести до експериментальних рішень, то, використовуючи варіанти класифікації основних фондів підприємств, норма амортизації для них складе 20%.

З огляду на розглянуті підходи, можна скласти таблицю експлуатаційних витрат на зміст системи автоматики (табл. 4.15.2), з огляду на існуючий (*EX*) і пропонується (*NEW*) варіанти.

Таблиця 4.15.2 - Експлуатаційні витрати

№	Елемент витрат	Сума, грн.	
		EX	NEW
1	Електроенергія	907	116
2	Заробітна плата персоналу	1800	336
3	Нарахування на заробітну плату	666	124
4	Амортизація (20%)	674,60	115,20
<b>ВСЬОГО</b>		4047,60	691,20

Таким чином, витрати на зміст існуючих і пропонується систем автоматики складають 4045 грн. і 691 грн., відповідно.

Витрати на виготовлення і впровадження нового обладнання  $Z_k$  вимагають капіталовкладень у розмірі 6470 грн.

Витрати на експлуатацію системи автоматики скоротяться і забезпечать економію в розмірі

$$Y = \sum Z_{EX} - \sum Z_{NEW}, \quad (4.15.4)$$

$$Y = 4045 - 691 = 3354 \text{ грн.}$$

Маючи отримані дані, можна оцінити економічні показники від впровадження системи автоматики без обліку інвестицій на реалізацію поставленої задачі.

Оскільки вартість проекту складає 6470 грн., то строк окупності  $T_{ок}$  даного пристрою можна розрахувати за формулою

$$T_{ок} = \frac{Z_k}{Y}, \quad (4.15.5)$$

$$T_{ок} = \frac{6470}{3354} = 1,93 \cong 2 \text{ роки.}$$

Якщо для реалізації проекту передбачається використовувати кредит будь-якого банку, то до статті витрат необхідно внести і річні ставки у відсотках до суми кредиту, що визначаються банками в різних розмірах.

Попередній розрахунок дозволяє планувати, що строк окупності проекту не перевищить 2 років. У сучасних умовах господарювання такий термін є

реальним і привабливим з погляду удосконалювання застарілої матеріально-технічної бази на будь-яких діючих аналогічних технологічних об'єктах.

Розглянутий розрахунок можна значно прискорити, скориставшись програмою «ПрЭ-ЭК». Інтерфейс програми проілюстрований на рис. 4.15.1.

Включення програми здійснюється натисканням кнопки «Включение».

Інтерфейс програми містить списки різної технічної літератури, спеціальних періодичних видань, інформації про патенти на винаходи та ін. дані, які користувач самостійно може організувати у відповідних папках використовуваного комп'ютера.

Після вводу вихідних даних у відповідні вікна витрат на впровадження й експлуатацію технічного рішення розрахунок виконується після натискання на кнопку «СЧЕТ».

Зручність програми полягає в можливості швидкої заміни статті витрат для одержання необхідного результату від упровадження нової техніки. На підставі отриманих результатів можна сформулювати вимоги до конкретного технічного рішення для досягнення заданих економічних показників.

Крім того, програма автоматично виконує експертизу даних, що вводяться користувачем для розрахунку.

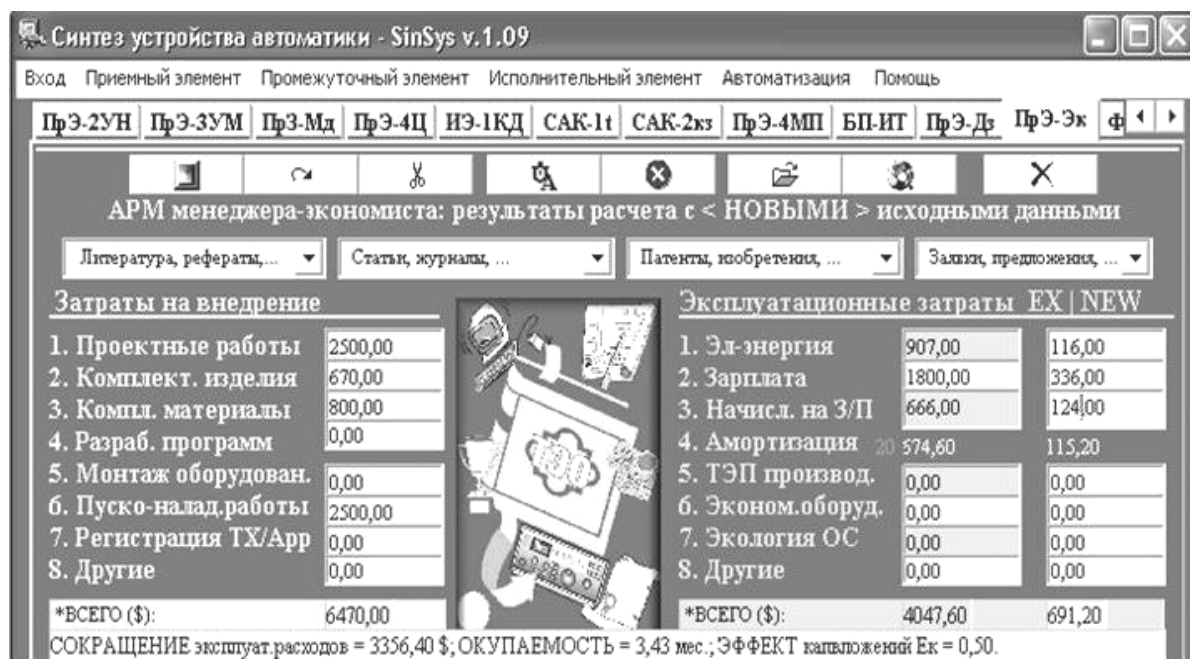


Рис. 4.15.1 – Інтерфейс програми «ПрЭ-ЭК»

Якщо вихідні величини для конкретного технічного рішення нелогічні або не відповідають вимогам, запропонованим до сучасних засобів автоматизації технологічних об'єктів, «експерт» програми зробить відповідні висновки. Такі особливості програми дозволяють уникнути неприпустимих помилок при проектуванні засобів автоматизації ТП або їхніх компонентів.

Результати розрахунку для технічного рішення розглянутого в розд. 1-4, отримані за допомогою програми «ПрЭ-ЭК», представлені в табл. 4.15.3.

Таблиця 4.15.3 – Результати розрахунку економічних показників

№	Статті витрат	Сума, грн.	Період окупності, рік
1	<b>Витрати на впровадження:</b>		
	Досліджувальні і проектні роботи	<b>2500</b>	
	Комплектуючі вироби	<b>670</b>	
	Розробка програмного забезпечення	<b>800</b>	
	Пуско-налагодочні роботи	<b>2500</b>	
	Інші	0	
2	<b>Експлуатаційні витрати «EX»:</b>		
	Електроенергія	<b>907</b>	
	Заробітна плата	<b>1800</b>	
	Нарахування на заробітну плату	<b>666</b>	
	Амортизація (20%)	574,60	
	Інші	0	
3	<b>Експлуатаційні витрати «NEW»:</b>		
	Електроенергія	<b>116</b>	
	Заробітна плата	<b>336</b>	
	Нарахування на заробітну плату	<b>124</b>	
	Амортизація (20%)	115,20	
	Інші	0	
4	<b>Скорочення експлуатаційних витрат</b>	3356,40	
5	<b>Окупність</b>		<b>1,9</b>

#### 4.16. Підготовка графічного матеріалу

Для підготовки необхідних ілюстрацій зручно користуватися програмним продуктом *MS PowerPoint*, що входить до комплексу програмного забезпечення *Microsoft Office* більшості побутових комп'ютерів з ОС *Windows*.

Принципові електричні й інші схеми зручно виконувати за допомогою багатьох графічних редакторів: *AutoCad*, *OrCad*, *КОМПАС*, або додатку *Sinpro* у пакеті *SinSys* («Поміць» ➤ «САПР схем») та ін.

## ВИСНОВКИ

Проведені дослідження автономного випрямного агрегату для живлення контактної мережі в мийно-прибиральному корпусі депо дозволяють зробити наступні висновки:

1. Аналітичним методом отримана математична модель статичного процесу нагрівання випрямного агрегату і встановлений основний канал керування «повітряний потік - температура перетворювача».
2. Вивчена математична модель динаміки дозволила одержати передатну функцію за основним каналом керування і досліджувати стійкість ОК.
3. На підставі аналізу отриманих результатів розроблена функціональна схема системи стабілізації температурного режиму випрямного елемента.
4. На підставі структурної схеми виконано розрахунки і розроблено схему компонентів локальної САК.
5. Розроблена загальна принципова електрична схема системи регулювання температури нагрівання випрямного агрегату, що відповідає вимогам до САР. Наведено перелік усіх необхідних компонентів (специфікація).
6. Проведено економічний аналіз розробленого пристрою автоматики, строк окупності якого при впровадженні в МПК не перевищує 2 років.

## ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

1. Відповідно до індивідуального завдання (табл. Д1) підготувати коротку характеристику технологічного об'єкта.
2. Описати призначення і принцип роботи об'єкта керування, з огляду на технологічні умови експлуатації (табл. Д1 - табл. Д3), вимоги до системи автоматизації, що розкривають керування об'єктом у ручному й автоматичному режимах, і взаємодія САР з локальною комп'ютерною мережею підприємства.
3. Досліджувати статичні характеристики ОК і підготувати висновок про отримані результати.
4. Досліджувати динамічні властивості ОК, включаючи оцінку його стійкості на основі побудови годографа, і сформулювати висновок про його поведінку при різних збурюваннях.
5. Обґрунтувати пропозиції щодо синтезу функціональної схеми системи регулювання процесом і описати її роботу.
6. Запропонувати розрахункову схему системи автоматизації ОК.
7. Виконати розрахунок компонентів схеми, використовуючи вихідні (табл. Д1 – табл. Д3) і довідкові (розд. 4) дані.
8. Зробити економічний аналіз проектованої системи автоматизації ТП.
9. Відповідно до вимог ДСТ підготувати функціональну і принципову електричну схеми розробленої автоматичної системи регулювання ТО. Представити перелік усіх компонентів САР.
10. Оформити розрахунково-пояснювальну записку до розробленого технічного рішення відповідно щодо вимог ДСТ технічної документації.

Міністерство освіти і науки України  
Харківська національна академія міського господарства  
Кафедра електричного транспорту

## **РОХРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА**

з дисципліни «Автоматизація технологічних процесів»

на тему: «Автоматизація випрямного агрегату  
мийно - прибирального корпусу депо»

Виконав: студент групи СА-  
200\_\_ 4 курсу  
факультету ЕТ  
Антоненко М.А.

Перевірів: доц. Єсаулов С.М.

Харків – ХНАМГ – 201\_ р.

Таблиця Д1 – Варіанти індивідуальних завдань

№ варіанта	Технологічний об'єкт	Об'єкт керування	Вимоги до ОК			
			Авток ерува ння	Ручне керува ння	Дистанційна передача	Уніфіков ані вихідні сигнали
1	Мийно-прибиральний корпус депо	Випрямний агрегат	+	+	+	+
2			+	+	+	+
...			+	+	-	-
n						

**Примітка:** «+» - передбачається; «-» – не передбачається.

Таблиця Д2 – Варіанти завдань

Варіант	$\sim U_{10}, \text{В}$	$I_{10}, \text{А}$	$=U_{20}, \text{В}$	$I_{00}, \text{А}$	$U_{00}, \text{В}$	$=U, \text{В}$	$Q_1, ^\circ\text{C}$	$Q_2, ^\circ\text{C}$
1	220	10	90	4,4	90	20	15	85
2								
...								
n								

**Примітка:** при використанні реальних елементів для розроблюваної системи автоматики дані про припустимі інтервали варіювання змінних узяти з технічних умов їхньої експлуатації. При відсутності довідкових даних величини інтервалів варіювання факторів прийняти рівними:  $U_1 = \pm 20\%$ ;  $I_1, U_0, I_0, U_2, I_2 = \pm 40\%$ .

Таблиця Д3 – Варіанти завдань

Варіант	$U, \text{В}$	$m, \text{кг}$	$S, \text{м}^2$	$V, \text{м/с}$	$d, \text{м}$
1	5,3	0,1	0,01	100	0,15
2					
...					
n					



## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Єсаулов С.М. Периферійні компоненти мікропроцесорних пристроїв. Методичні вказівки до вивчення курсу «Мікропроцесорні пристрої» і виконання контрольної та самостійної робіт (для студентів 4-5 курсів усіх форм навчання спеціальності 7.092202 «Електричний транспорт») - Харків: ХНАМГ, 2007.- 63 с.
2. Єсаулов С.М. Мікропроцесорні пристрої на електротранспорті. Навчальний посібник з курсу «Мікропроцесорні пристрої» (для студентів 4 - 5 курсів усіх форм навчання спеціальності 7.092.202 - «Електричний транспорт») – Харків: ХНАМГ, 2007. – 182с.
3. Єсаулов С.М. Мікропроцесорні пристрої. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Мікропроцесорні пристрої» (для студентів 4 курсу усіх форм навчання спец. 7.092202 «Електричний транспорт». – Харків: ХНАМГ, 2006. -66 с.
4. Есаулов С.М. SinSys – учебная программа для домашнего ПК студента. - [www.tmn.hotmail.ru](http://www.tmn.hotmail.ru), ©2004-2007.
5. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – К.: Либідь, 1997. – 544 с.
6. Воронов А.А. Теория автоматического управления. – М.: Высш. школа, 1986. – 356 с.
7. Полоцкий Л.М., Лапшенков Г.И. Автоматизация производств. Теория, расчет и проектирование систем автоматизации. – М.: Химия, 1992. – 299 с.
8. Ключев А.С., Глазов Б.В., Миндин М.Б. Техника чтения схем автоматического управления и технологического контроля. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 376 с.
9. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 296 с.

## ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП.....	3
ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБ'ЄКТА І ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	5
1 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	5
1.1 Розробка аналітичної моделі статички.....	5
1.2 Аналіз моделі статички.....	10
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	11
2.1 Аналітичне моделювання динаміки об'єкта керування.....	11
2.2 Визначення перехідних характеристик і їх аналіз.....	16
3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБ'ЄКТА.....	19
3.1 Синтез системи автоматичного регулювання.....	19
3.2 Розробка функціональної схеми САР.....	19
4 РОЗРАХУНОК І РОЗРОБКА КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	21
4.1 Розробка структурної схеми контуру регулювання.....	21
4.2 Розрахунок і розробка вимірювальної схеми РО.....	22
4.3 Розрахунок і розробка формувача уніфікованого сигналу.....	25
4.4 Розробка пристрою порівняння двох величин.....	29
4.5 Розробка пристрою сигналізації.....	30
4.6 Розрахунок параметрів для вибору транзистора підсилювача...	31
4.7 Використання релейно-контактних систем блокування.....	35
4.8 Розрахунок фотометричних приймальних елементів.....	38
4.9 Розрахунок і розробка логічних приймальних елементів.....	41
4.10 Розрахунок і розробка формувача керуючого сигналу.....	44
4.11 Розрахунок силового трансформатора блоку живлення.....	49
4.12 Розробка імпульсного джерела електричного живлення.....	57
4.13 Розробка блок-схеми алгоритму керування ТО.....	61
4.14 Реалізація алгоритмів керування програмувальними технічними засобами.....	61
4.15 Економічні показники проекрованої системи автоматизації ТО.....	63
4.16 Підготовка графічного матеріалу.....	67
ВИСНОВКИ .....	68
ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ.....	69
ДОДАТОК 1.....	70
Таблиця Д1.....	71
Таблиця Д2.....	71
Таблиця Д3.....	71
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	72

## НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

**Синтез системи автоматизації технологічного об'єкта.** Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни **«Автоматизація технологічних процесів»** (для студентів 4 курсу всіх форм навчання за напрямом підготовки 0922 (6.050702) «Електромеханіка»)

Укладачі **Єсаулов Сергій Михайлович**

**Бабічева Ольга Федорівна**

За редакцією авторів

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2010, поз. 174М

---

Підп. до друку 03.09.2010р.  
Друк на ризографі.  
Зам. №

Формат 60x84 1/16  
Ум. друк. арк. 3,1  
Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:  
Харківська національна академія міського господарства,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002  
Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК №731 від 19.12.2001